



MIGUEL ÂNGELO JOSÉ SERPA

Licenciado em Engenharia Geológica

CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DAS AREIAS EXPLORADAS NA MINA VIA-VAI, RIO MAIOR

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Geológica

Orientador: Doutor José António de Almeida,

Prof. Associado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNL

Co-Orientador: Doutor Fernando Joaquim Fernandes Tavares Rocha,

Prof. Catedrático, Universidade de Aveiro

Júri:

Presidente: Doutor Martim Afonso Ferreira de Sousa Chichorro, Prof. Auxiliar – FCT/UNL

Arguente: Doutora Sofia Verónica Trindade Barbosa, Prof. Auxiliar – FCT/UNL

Vogais: Doutor José António de Almeida, Prof. Associado – FCT/UNL



Julho 2018

CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DAS AREIAS EXPLORADAS NA MINA VIA-VAI, RIO MAIOR

Copyright em nome de Miguel Ângelo José Serpa, da FCT/UNL e da UNL.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

A conclusão desta dissertação representa o fim de mais uma etapa no meu percurso pessoal e académico, tal não seria possível sem o apoio e colaboração de um conjunto de pessoas e entidades, às quais deixo o meu mais sincero agradecimento.

Ao Doutor José António de Almeida, meu orientador, um enorme e profundo agradecimento por todo o apoio, dedicação, disponibilidade e paciência ao longo da execução deste trabalho.

Ao Doutor Fernando Rocha, meu co-orientador, por todo o apoio e colaboração prestados na realização desta dissertação, nomeadamente execução das análises XRF e XRD.

Ao Doutor Martim Chichorro pela colaboração e disponibilidade na observação mineralógica com lupa.

À empresa Sifucel – Sílicas, S.A. pela disponibilidade de colaboração neste trabalho, através do fornecimento de amostras de uma das suas explorações.

Ao GeoBioTec e à Universidade de Aveiro, pela colaboração na realização de análises às amostras.

Ao Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa pela utilização de laboratórios e equipamentos. A todo o pessoal docente e não docente, por todo apoio, incentivo e transmissão de conhecimento ao longo deste percurso.

À Universidade de Évora, e ao pessoal docente e não docente, pelo seu enorme contributo na minha formação que me permitiu atingir este objetivo.

Aos colegas e amigos por todo o incentivo ao longo de todo este percurso. Especialmente a “turminha”, Correia, Gonçalinho, Joel, Paulo, Susana e Tânia.

À Cláudia por ter estado sempre presente ao longo de todo o meu percurso académico. E constantemente a apoiar e incentivar, sendo uma peça fundamental na realização deste trabalho.

À minha família pela educação que me transmitiu e por me ter proporcionado o embarque nesta aventura. Em especial aos meus pais por tudo o que fizeram, permitindo-me chegar aqui.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo caracterizar as areias siliciosas exploradas pela empresa Sifucel – Sílicas, S.A. na mina Via-Vai localizada nas imediações da cidade de Rio Maior, em particular listar e quantificar a composição mineralógica e associações minerais nos grãos.

Para uma completa caracterização desta matéria-prima foram utilizadas 6 amostras de areias, uma à saída da mina (ROM) e as restantes nas várias etapas dos processos de beneficiação, incluindo os rejeitados.

O trabalho experimental iniciou-se com uma caracterização granulométrica das areias à saída da mina. Seguidamente, fez-se uma separação sequencial dos minerais presentes, primeiro num separador magnético e depois com um líquido denso. Esta separação permitiu quantificar as frações dos minerais magnéticos e mais pesados presentes nas amostras.

Realizou-se uma análise por espectrometria por fluorescência de raios x às 6 amostras recolhidas, de modo a obter uma primeira indicação dos minerais penalizantes presentes nas areias.

Em seguida, foram preparadas 5 amostras para uma análise mineralógica com um QEMSCAN. O resultado de cada análise é uma imagem mineralógica com uma resolução espacial de 10 μm , onde cada célula(pixel) da imagem representa um dado mineral. Para cada imagem construiu-se uma tabela multivariada de dados, onde os grãos são os indivíduos, os minerais são as propriedades e os valores a proporção de cada mineral no grão. Estas tabelas foram processadas por análise multivariada de dados de forma a encontrar as principais tipologias de associações mineralógicas existentes. Os resultados do QEMSCAN foram comparados e validados com os da difração de raios X e observação à lupa.

Observou-se que o mineral dominante é o quartzo e que a maior parte dos grãos são só de quartzo. Foram ainda encontradas as seguintes associações mineralógicas: i) turmalina + caulinite; ii) andaluzite + grafite.

Palavras-chave: Areias siliciosas, Rio Maior, QEMSCAN, caracterização de areias.

ABSTRACT

The aim of present work is to characterize the quartz sands mined by Sifucel - Sílicas, S.A. in the Via - Vai mine, located nearby Rio Maior, in particular to list and quantify the mineralogical composition and mineral associations in the grains.

For a complete characterization of this raw material, 6 samples were collected, one at the exit of the mine (ROM) and the remaining at the various stages of the beneficiation processes including the rejected ones.

The experimental work started with a granulometric characterization of the sands at the exit of the mine. Thereafter, the minerals present were sequentially separated, first in a magnetic separator and then in a dense liquid. This separation allowed to quantify the fractions of the heavier and magnetic minerals present in the samples.

An x-ray fluorescence spectrometry analysis was performed on the 6 samples collected, to obtain a first indication of the penalizing minerals present in the sands.

Then, 5 samples were prepared for a mineralogical analysis with a QEMSCAN. The result of each analysis is a mineralogical image with a spatial resolution of 10 μm , where each image cell(pixel) represents a mineral. For each image we constructed a multivariate data table, where the grains are the individuals, the minerals are the properties and the values the proportion of each mineral in the grain. These tables were processed by multivariate analysis of data in order to find the main typologies of existing mineralogical associations. The results of QEMSCAN were compared and validated with those of X-ray diffraction and magnifying glass observation.

The predominant mineral is quartz and most of the grains are only of quartz. The following mineralogical associations were also found: i) tourmaline + kaolinite; ii) andalusite + graphite.

Key-words: Quartz Sands, Rio Maior, QEMSCAN, sands characterization.

Índice Geral

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento e Objetivos	1
1.2 A Empresa Sifucel.....	3
1.3 Organização do Trabalho	3
2. ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO E GEOLÓGICO DO DEPÓSITO MINERAL AREIAS DE RIO MAIOR.....	5
2.1 Enquadramento Geográfico.....	5
2.2 Enquadramento Geológico.....	6
2.3 A Importância Económica da Matéria-Prima Estudada e Principais Mercados.....	8
3. TECNOLOGIAS DE EXPLORAÇÃO E BENEFICIAÇÃO DAS AREIAS EXPLORADAS NA MINA VIA-VAI EM RIO MAIOR.....	11
3.1 Exploração das Areias.....	11
3.2 Unidades de crivagem, lavagem e classificação de areia	12
3.2.1 Lavagem e extração do caulino.....	12
3.2.1.1 Tremonha de Alimentação	12
3.2.1.2 Tromel	12
3.2.1.3 Bateria de Crivos.....	12
3.2.1.4 Hidrociclones	13
3.2.2 Separação Hidráulica.....	13
3.2.2.1 Jiga	13
3.2.2.2 Espirais	14
3.2.3 Separação por Flutuação	14
4. MÉTODOS.....	15
4.1 Areias Siliciosas	15

4.2	Análise mineralógica.....	16
4.2.1	QEMSCAN	16
4.2.2	Difração de Raios X	18
4.3	Análise Geoquímica	19
4.3.1	Espectrometria de Fluorescência de Raios X	19
5.	CASO DE ESTUDO.....	21
5.1	Amostras de Partida	21
5.2	Análise Granulométrica.....	23
5.3	Análise Indicativa.....	25
5.3.1	XRF	25
5.4	Separação Sequencial de Minerais e Balanço de Massas.....	26
5.5	Análises do QEMSCAN.....	29
5.5.1	Resultados obtidos e interpretação preliminar	29
5.5.2	Análise e Processamento Estatístico das Imagens QEMSCAN	34
5.5.2.1	Resultados para a amostra r4n-04	35
5.5.2.2	Resultados para a amostra r4n-05	41
5.6	Análises Complementares	46
5.6.1	XRD	46
5.6.2	Observação em Lupa	48
5.7	Discussão e Validação de Resultados	54
6.	RECOMENDAÇÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	55
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Exploração de areias siliciosas por dragagem em Rio Maior, mina Via-Vai. Fonte: https://www.parapedra.pt/images/sifucel/riomaior/sifucelriomaior2.jpg	3
Figura 2.1 - Localização geográfica da exploração (adapt. Visa Consultores, 2004)	5
Figura 2.2 - Unidades morfo-estruturais da Península Ibérica com destaque para a Bacia Lusitaniana, e identificação da mina (adapt. Kullberg, 2000;apud Ribeiro et al., 1979)	6
Figura 2.3 – Classificação das matérias-primas utilizadas pela indústria Europeia de acordo com a importância económica e o risco de abastecimento e posicionamento das areias siliciosas, http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_pt	9
Figura 3.1 - Fluxograma do processo de extração e beneficiação das areias siliciosas da Sifucel	11
Figura 4.1 - Sequência de análise do QEMSCAN (Jaime, Gottlieb, Butcher, & Dobbe, 2009). 16	
Figura 4.2 - Esquema de funcionamento de um Difratómetro de Raios X (Terroso, 2005).....	18
Figura 4.3 - Esquema de Funcionamento de um Espectrómetro de Fluorescência de Raios X (Terroso, 2005).....	19
Figura 5.1 – Fluxograma do processo de extração e beneficiação, com identificação dos pontos de recolha de amostras.	22
Figura 5.2 – Curva granulométrica da amostra S40	24
Figura 5.3 – a) Separador magnético Frantz b) separação por líquido denso em funil	26
Figura 5.4 - Imagem mineralógica das amostras r4n-01, r4n-02, r4n-03, r4n-04, r4n-05 e legenda de cores dos minerais presentes.	29
Figura 5.5 - Grãos das amostras r4n-01, r4n-02, r4n-03, r4n-04 e r4n-05 separados e posicionados por dimensão.	30
Figura 5.6 – Diagramas de dispersão dos valores relativos aos minerais turmalina / caulinite e andaluzite / não classificado. As unidades são em número de pontos por mineral e por grão.	36
Figura 5.7 - Dendrograma relativo à tabela de dados da amostra r4n-04 com identificação dos 5 grupos (linha horizontal a azul).....	36

Figura 5.8 - Representação gráfica ACP da amostra r4n-04: pesos das componentes principais, matriz de correlação entre as variáveis de partida e as componentes principais e gráfico de projeção das propriedades nas CP12, CP13, CP14 e CP15.....	38
Figura 5.9 - Exemplos de associações minerais da amostra na imagem do QEMSCAN: a)turmalina/caulinite b) andaluzite (kyanite)/não classificado.....	39
Figura 5.10 - Representação gráfica ACP da amostra r4n-04: gráfico de projeção dos indivíduos nas CP12, CP13, CP14 e CP15 e sobreposição dos 5 grupos propostos.....	40
Figura 5.11 - Dendrograma relativo à tabela de dados da amostra r4n-05 com identificação dos 3 grupos (linha horizontal a azul).....	42
Figura 5.12 - Representação gráfica ACP da amostra r4n-05: pesos das componentes principais, matriz de correlação entre as variáveis de partida e as componentes principais e gráfico de projeção das propriedades nas CP12, CP13, CP14 e CP15.....	43
Figura 5.13 - Exemplos de associações minerais da amostra na imagem do QEMSCAN: a)turmalina/caulinite b) andaluzite (kyanite)/não classificado.....	44
Figura 5.14 - Representação gráfica ACP da amostra r4n-05: gráfico de projeção dos indivíduos nas CP12, CP13, CP14 e CP15 e sobreposição dos 3 grupos propostos.....	45
Figura 5.15 - a) Quartzo b) Feldspatos.....	49
Figura 5.16 – a) Distena b) Quiastolite c) Andalusite d) Silimanite	50
Figura 5.17 – a) Rútilo b) Leucoxena	50
Figura 5.18 - Zircão;	51
Figura 5.19 – a) Quiastolite b) Moscovite.....	52
Figura 5.20 – a) Silimanite b) Turmalina.....	52
Figura 5.21 - Estauroлите;.....	53

Índice de Tabelas

Tabela 5.1 – Designações das seis amostras estudadas, origem da amostra e peso	21
Tabela 5.2 – Resultados da análise granulométrica à amostra S40	23
Tabela 5.3 - Resultados obtidos da análise XRF.....	25
Tabela 5.4 - Percentagem das frações sucessivamente divididas por separação magnética e separação gravítica	27
Tabela 5.5 – Percentagens de cada mineral identificado nas amostras do QEMSCAN.....	31
Tabela 5.6 - Percentagens de cada mineral identificado nas amostras do QEMSCAN, recalculadas para 100% retirando o mineral quartzo	32
Tabela 5.7 – Matriz de coeficientes de correlação de Pearson (metade inferior) e Spearman (metade superior) para as ocorrências minerais por grão.	35
Tabela 5.8 – Tabela descritiva dos 5 grupos de grãos que foram identificados com a CAH, valores em proporção relativa.	37
Tabela 5.9 – Matriz de coeficientes de correlação de Pearson (metade inferior) e Spearman (metade superior) para as ocorrências minerais por grão na amostra r4n-05.....	41
Tabela 5.10 – Tabela descritiva dos 3 grupos de grãos que foram identificados com a CAH, valores em proporção relativa.	42
Tabela 5.11 - Descrição amostras analisadas no XRD;.....	46
Tabela 5.12 - Resultados obtidos da análise do XRD;	46
Tabela 5.13 - Amostras observação com lupa.....	48
Tabela 6.1 - Especificações das areias siliciosas para vidro de alta qualidade;	55
Tabela 6.2 - Relação propriedade – mineral para separação do quartzo	56

1. INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

A areia é um conjunto de partículas desagregadas, cuja dimensão varia entre 0,1 e 0,5 mm. Esta é produto final resultante do processo de erosão das rochas, uma parte importante do ciclo das rochas. Nesse processo, fragmentos de rocha são transportados, principalmente por água e vento. Durante esse percurso, com a constante abrasão e ataques químicos, os minerais mais frágeis são removidos e os mais resistentes tornam-se menores e mais arredondados. Um maior tempo de transporte dos grãos, provoca um maior amadurecimento destes, e isso leva a uma composição química mais pura e uma forma mais arredondada (Platias, Vatalis, & Charalampides, 2014).

O termo areias siliciosas é atribuído a areias que apresentam um elevado teor em sílica, sob a forma de quartzo, e são materiais extremamente importantes em várias áreas da indústria, tais como, indústria vidreira, fundição, cerâmica, química, petróleo, bem como na horticultura. Na construção civil não são utilizadas areias siliciosas como agregado, pois para esta finalidade não são necessárias propriedades químicas tão exigentes, podendo ser utilizada areia com menor teor em sílica, a qual, tem custos muito inferiores (British Geological Survey, 2004; Davis & Tepordei, 1985; G. C. Ferreira, 1997).

O quartzo é um dos minerais mais abundantes na superfície terrestre, trata-se de um silicato formado por tetraedros de sílica e oxigénio, com a fórmula química SiO_2 . Este é encontrado em todos os tipos de rocha, de todas as idades geológicas, em qualquer parte do mundo. Possui uma vasta gama de utilizações, desde agregado para a construção civil, ao vidro, até à fibra ótica utilizada nas comunicações (Zdunczyk & Linkous, 1994).

A sílica é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre, atrás do oxigénio (Dill, 2010). Ocorre, na natureza, de duas formas distintas, amorfa e cristalina. A primeira é representada pelo diatomito, uma rocha sedimentar constituída por carapaças de algas diatomáceas e sílica (França, Luz, & Inforçati, 1994). A sílica cristalina é quartzo, que podemos encontrar em veios de quartzo, areia ou rochas como o arenito e quartzito.

As areias siliciosas de Rio Maior são finas e bem calibradas, indicando que sofreram transporte eólico. A sua composição é essencialmente quartzo com um elevado grau de pureza. Estas areias possuem ainda alguma quantidade de caulinite, um subproduto com algum valor económico, e que pode ser recuperado por um processo de lavagem (Carvalho & Pereira, 1974).

As areias siliciosas de Rio Maior estão inseridas na categoria das areias especiais, esta denominação deve-se à sua composição essencialmente siliciosa e ao elevado grau de pureza, e

essas distintas características levam a que a sua produção seja direcionada para indústrias mais qualificadas (Carvalho & Pereira, 1974; Moura & Velho, 2011). Estas características levaram a que a Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG) classificasse as areias exploradas em Rio Maior como matéria-prima estratégica e de âmbito nacional, assim a regulamentação de prospeção, pesquisa e exploração destes materiais enquadra-se na classificação de mina e tem a designação de depósito mineral.

Em Portugal, segundo Moura & Velho (2011), existem quatro centros produtores de areias siliciosas, em Alhadas no concelho de Figueira da Foz, na Guia no concelho de Pombal, em Coima e em Rio Maior. A região de Rio Maior é o maior e mais importante centro produtor nacional destas areias, com reservas estimadas na ordem dos 673 milhões de toneladas até aos 60 metros de profundidade, prevendo-se existirem aproximadamente mais 600 milhões de toneladas abaixo dessa profundidade (Carvalho & Pereira, 1974; Moura & Velho, 2011).

Este trabalho tem como objetivo efetuar uma caracterização mineralógica com fins económico-mineiros das areias siliciosas exploradas pela empresa Sifucel na mina Via-Vai, localizada nas proximidades da cidade de Rio Maior. Esta caracterização envolveu, em primeiro lugar, uma análise granulométrica, posteriormente foi efetuada uma análise mineralógica primeiro com o equipamento QEMSCAN e depois a validação dos resultados obtidos com uma análise no equipamento de Difração de Raios X e com uma observação com lupa.

A matéria-prima foi também caracterizada quer pela separação por densidade dos minerais que a constituem quer pela suscetibilidade magnética dos mesmos. Na análise do QEMSCAN foi obtida uma imagem mineralógica de cada uma das amostras, que foi alvo de uma análise estatística com auxílio do software “R”, com a finalidade de determinar as associações minerais presentes, bem como contabilizar a ocorrência de partículas mistas e de minerais com inclusões.

Finalmente, a areia foi caracterizada do ponto de vista económico, descrevendo-se os aspetos que a distinguem das areias comuns, e sua importância para a indústria. Além disso, foram analisados os principais mercados, indústrias e produtos, onde esta matéria-prima possui um papel fundamental.

1.2 A EMPRESA SIFUCEL

A Sifucel – Sílicas, S.A. é uma empresa pertencente ao Grupo Parapedra. Este grupo foi fundado no início de 1979 e encontra-se sediado na cidade de Rio Maior. O Grupo atua em várias áreas de negócio, desde a transformação de calcários e derivados, a areias e até ao transporte rodoviário.

Os produtos produzidos pelo grupo são utilizados nas mais diversas finalidades, como produção de cerâmica, vidro e cimento e utilização em construção civil, fundição, química, entre inúmeras outras áreas.

A atividade principal da Sifucel é a extração e beneficiação de areias siliciosas. Detém três explorações, localizadas em Alcácer do Sal, Mosteiros e Rio Maior. Segundo o site do Grupo Parapedra (2017), estas unidades têm uma capacidade de produção diária, respetivamente, de 6000, 1000 e 3200 toneladas.



Figura 1.1 – Exploração de areias siliciosas por dragagem em Rio Maior, mina Via-Vai. Fonte: <https://www.parapedra.pt/images/sifucel/riomaior/sifucelriomaior2.jpg>

A unidade de exploração de Rio Maior, mina Via-Vai, em 2004 apresentava reservas úteis de areias especiais de aproximadamente 3,080 milhões de m³, o equivalente a cerca de 6,160 milhões de toneladas. A partir da beneficiação das areias é ainda obtido um subproduto, o caulino.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A tese encontra-se organizada em sete capítulos. No primeiro capítulo são apresentados o enquadramento geral e os objetivos do estudo, e faz-se uma breve descrição da empresa Sifucel. No segundo capítulo faz-se um enquadramento geográfico e geológico do depósito mineral estudado, onde no final releva-se a importância da matéria-prima areias de Rio Maior, e os principais mercados e indústrias.

No capítulo três descrevem-se as tecnologias utilizadas na empresa, quer na exploração quer nas centrais de tratamento e beneficiação. No capítulo quatro “Métodos” descrevem-se o estado da arte de caracterização deste tipo de materiais, nomeadamente no que se refere à mineralogia (QEMSCAN e XRD) e à geoquímica (XRF).

No capítulo cinco descrevem-se as várias fases de caracterização das areias de Rio Maior, concretamente descrevem-se as amostras de partida, a análise granulométrica do *tal-qual*, a separação sequencial de minerais e balanço de massas, a análise do QEMSCAN e processamento das imagens mineralógicas e as análises complementares XRD, XRF, observação em lupa e lâminas delgadas. No final faz-se a discussão em conjunto dos resultados, nomeadamente comparam-se os que são obtidos pelos vários métodos, e as respetivas vantagens e limitações.

No capítulo seis são sugeridas recomendações sobre eventuais melhorias do processo de concentração e valorização destas areias e apresentam-se as considerações finais e sugestões para estudos futuros. Finalmente no capítulo sete listam-se as referências bibliográficas que suportaram este estudo.

2. ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO E GEOLÓGICO DO DEPÓSITO MINERAL AREIAS DE RIO MAIOR

2.1 ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO

O depósito mineral Areias de Rio Maior localiza-se na freguesia e concelho de Rio Maior e distrito de Santarém, no centro de Portugal. Encontra-se nas imediações das povoações de Rio Maior, Azinheira e Quintas e do Parque Industrial de Rio Maior, onde se localiza a sede da empresa e a zona de beneficiação das areias.

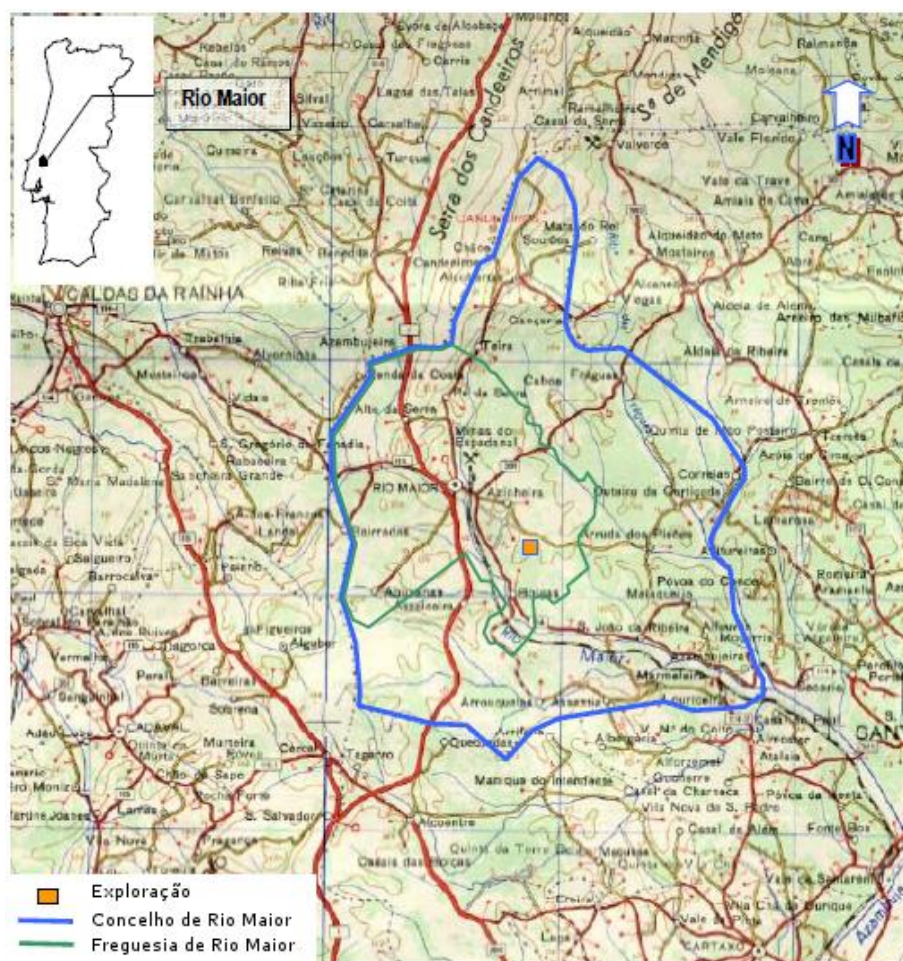


Figura 2.1 - Localização geográfica da exploração (adapt.Visa Consultores, 2004)

2.2 ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

O depósito mineral Areias de Rio Maior encontra-se na unidade tectono-estratigráfica mesozoica denominada Bacia Lusitaniana, trata-se de uma bacia sedimentar que se desenvolveu na Margem Ocidental Ibérica (Rui Dias, Araújo, Terrinha, & Kullberg, 2013). Esta unidade foi formada em distensão, por estiramento crostal, inicialmente associado à fragmentação da Pangeia, mais especificamente na abertura do Atlântico Norte (Kullberg, 2000).

A Bacia Lusitaniana alonga-se segundo a direção NNW-SSE, numa extensão de cerca de 225 km por 70 km de largura, e encontra-se limitada, a Este pelo Maciço Hespérico, não estirado, e a Oeste pelo Horst da Berlenga, materializados por um complexo sistema de falhas (Figura 2.2). Os limites Norte e Sul, são definidos, respetivamente, por uma transição “en échelon” para a bacia do Porto e na elevação de soco a Sul da Arrábida (Kullberg, 2000).

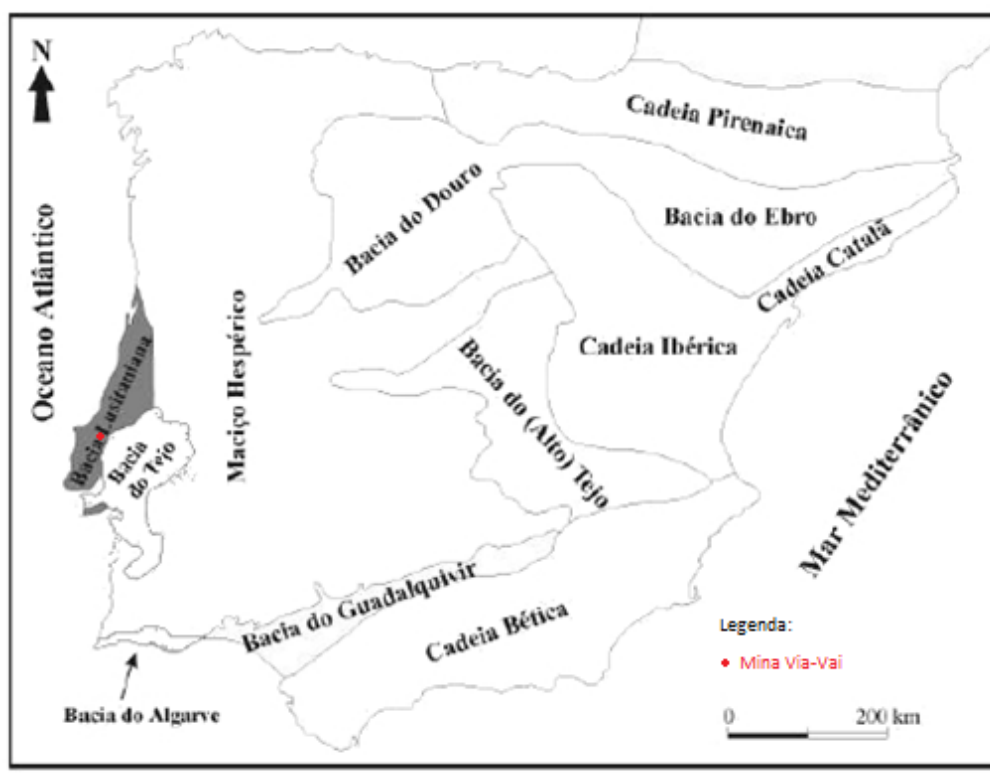


Figura 2.2 - Unidades morfo-estruturais da Península Ibérica com destaque para a Bacia Lusitaniana, e identificação da mina (adapt. Kullberg, 2000;apud Ribeiro et al., 1979)

Este depósito encontra-se, mais particularmente, numa unidade geológica denominada Bacia de Rio Maior, no “Complexo astiano de Nadadouro e Águas Santas” e “Camadas vilafranquianas com lignitos e diatomitos de Óbidos, de Rio Maior, etc.”. Esta é caracterizada por formações

marinhas, astianas, que enchem as antigas depressões escavadas pela erosão fluvial contemporânea do Miocénico superior (Zbyszewski & Almeida, 1960).

Segundo a Notícia Explicativa da folha 26-D Caldas da Rainha, Zbyszewski & Almeida (1960), na Bacia pliocénica de Rio Maior existem bons afloramentos de areias caulíníferas entre Casais do Vale de Óbidos, Fonte Branca, Figueiredos, Panasqueira e Asseiceira. Estes apresentam inclinação de cerca de 10° para SE, existindo algumas anomalias de pendores na passagem das falhas.

A Bacia de Rio Maior tem uma extensão aproximada de 7,5 quilómetros de comprimento por 3 quilómetros de largura, alongada na direção NNW-SSE (Carvalho & Pereira, 1974). É constituída por depósitos sedimentares de fácies continental.

Esses depósitos sedimentares são constituídos por uma espessa camada de areias finas, bem calibradas, pouco argilosas, caulíníticas, brancas e amareladas, na parte inferior. Acima desta camada existe o complexo dos lignitos e diatomitos, e a superfície é coberta por areias com intercalações de argila e calhaus quartzo-quartzíticos sub-rolados, em camadas mais ou menos alternantes (Carvalho & Pereira, 1974).

As características das areias deste depósito, nomeadamente a sua uniformidade mineralógica e granulométrica, apontam para a ocorrência de transporte eólico. Neste tipo de transporte, a fricção entre os grãos, e a perda dos grãos mais pesados e de maiores dimensões, levou a que se obtenham estas características, que distinguem dos restantes depósitos de areias (Carvalho & Pereira, 1974; Moura & Velho, 2011).

2.3 A IMPORTÂNCIA ECONÓMICA DA MATÉRIA-PRIMA ESTUDADA E PRINCIPAIS MERCADOS

A areia siliciosa de Rio Maior, tal como todas as outras areias siliciosas, para possuir valor económico necessita de seguir um conjunto de aspetos fundamentais. O seu valor está diretamente relacionado com a granulometria e com o tipo e quantidade de contaminantes. No que respeita à granulometria, é fundamental a formação de lotes com especificações de calibre bem definidas. Em relação aos contaminantes, a presença de feldspatos, plagióclases, micas e óxidos de ferro são prejudiciais no valor das areias, pois influenciam os teores de Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Na_2O e K_2O , que deve ser o mais baixo possível (Moura & Velho, 2011).

Na última década houve uma grande flutuação nos consumos de areias siliciosas, provocada pela grande recessão económica global. Todavia, o aumento da variedade de utilizações desta matéria-prima provocado pelo desenvolvimento tecnológico levou a novo aumento da procura nos últimos anos (Mansour, 2015).

Na perspetiva da Comissão Europeia, as areias siliciosas e o quartzo não são consideradas matérias-primas críticas (*critical raw-materials*), porque mesmo tendo uma nota razoável no item importância económica (2,6 numa escala de 7,5), o risco de abastecimento é muito baixo (cerca de 0,2 numa escala até 5) (Figura 2.3). Em síntese, o quartzo e as areias siliciosas tem importância económica para a Europa, mas a Europa é autossuficiente, o que releva a importância da manutenção das explorações mineiras deste tipo, que devem ser competitivas e utilizar as melhores tecnologias disponíveis (MTD). Este tipo de quartzo pode ser obtido não só através das areias siliciosas, como também através da exploração de veios de quartzo (Platias, Vatalis, & Charalabidis, 2013).

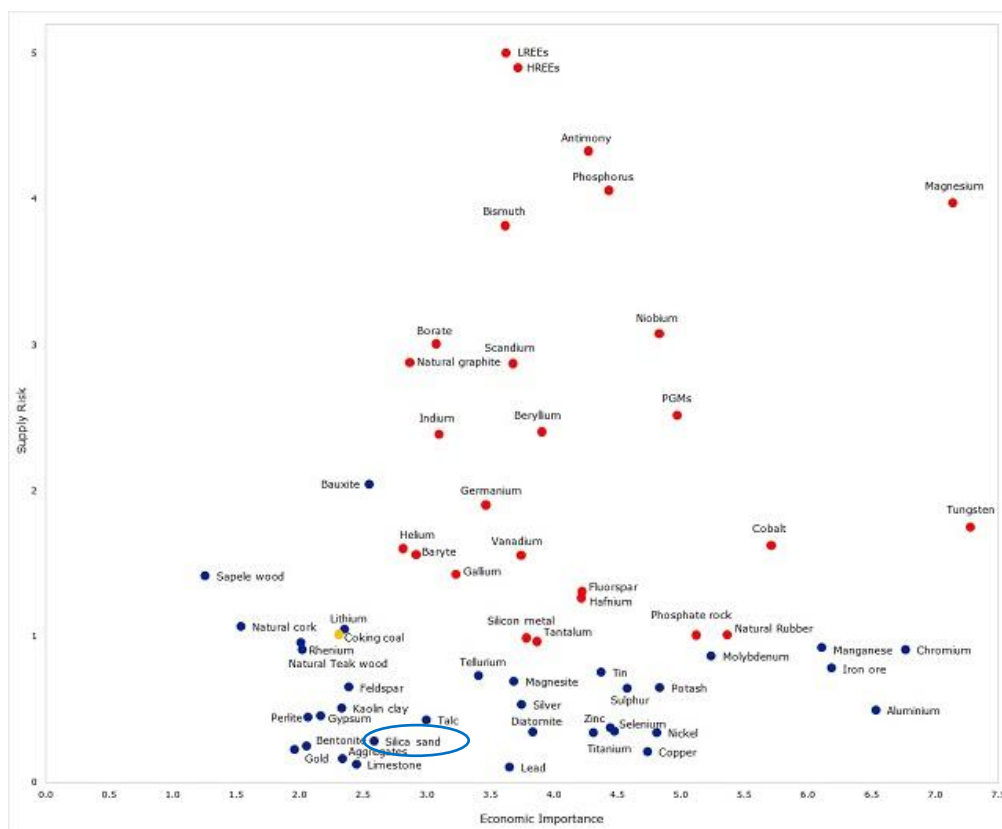


Figura 2.3 – Classificação das matérias-primas utilizadas pela indústria Europeia de acordo com a importância económica e o risco de abastecimento e posicionamento das areias siliciosas, http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_pt

A eficiência dos processos de beneficiação das areias siliciosas, e a capacidade de produzirem concentrados mais puros, provocam um significativo aumento do valor destas areias, devido a uma procura superior à oferta desta matéria-prima com elevada pureza, especialmente pelo setor tecnológico. Atualmente este setor encontra-se em rápida expansão, e esta matéria-prima é fundamental para a produção por exemplo de, células solares fotovoltaicas, componentes de chips para computadores, vidro ótico e fibra ótica de longa distância (Platias et al., 2013; Vatalis, Charalampides, Platias, & Benetis, 2014). Muitas indústrias utilizam areias siliciosas como o maior componente da sua produção. A procura destas areias centra-se essencialmente nas indústrias do vidro, fracturação hidráulica, fundição, construção e química (Mansour, 2015).

Em Portugal, segundo dados da DGEG¹, em 2016 foram exploradas 1 178 510 toneladas de areias siliciosas, valor que representa uma diminuição de aproximadamente 226 000 toneladas em relação à produção de 2014 (1 404 101 t).

¹ Direção Geral da Energia e Geologia

As exportações no ano de 2016, foram de 442 291 toneladas de areias, um pouco mais de um terço ($\approx 37\%$) da produção, no valor pouco superior a 10 milhões de euros. Os dados do portal da DGEG não especificam o tipo de areia, mas dado não ser viável financeiramente transportar areia comum a longas distâncias, estima-se que todo o valor corresponde a areias siliciosas. Os dados das exportações desta matéria-prima, indicam um crescimento ininterrupto desde 2009.

A produção mundial de areias siliciosas foi de 122 milhões de toneladas em 2007, havendo uma quebra na produção anual de cerca de 10 milhões de toneladas, nos anos de 2008 e 2009. No ano de 2010 houve uma recuperação, tendo a produção atingido valores próximos de 2007. Nos dois anos seguintes houve um novo aumento da produção, atingindo as 140 milhões de toneladas em 2012 (Mansour, 2015).

Segundo dados de 2011, o continente europeu é o maior produtor mundial de areias siliciosas, foram produzidos aproximadamente 58 milhões de toneladas, representando cerca de 47 % da produção mundial. Os principais países responsáveis pela liderança da Europa neste setor são a Itália, Alemanha, Reino Unido, Áustria, França e Espanha. Em relação aos restantes continentes, destaca-se a América do Norte com uma produção estimada de 28,5 %, a Ásia com 9,8 %, África com 5,7 %, Austrália com 4,5 % e a América do Sul cuja produção representa aproximadamente 4,4 % (Mansour, 2015).

Ainda segundo Mansour (2015), na próxima década prevê-se um aumento da procura anual de areias siliciosas, entre os 5 % e 6 %. Esta previsão deve-se especialmente ao aumento da procura nas áreas energética, isolamento de edifícios com vidros duplos, da exploração de hidrocarbonetos, no processo de fracturação hidráulica para recuperação de petróleo e gás, da tecnologia, eletrónica, painéis fotovoltaicos, e utilização de fibra de vidro em barcos, aviões, automóveis.

3. TECNOLOGIAS DE EXPLORAÇÃO E BENEFICIAÇÃO DAS AREIAS EXPLORADAS NA MINA VIA-VAI EM RIO MAIOR

As areias à saída da mina já são constituídas essencialmente por quartzo, todavia existem minerais secundários que mesmo em baixas percentagens fazem com que a areia não reúna os requisitos das indústrias a que se destinam, assim é necessário submetê-las a processos de beneficiação tendo em vista a redução da quantidade de impurezas (minerais não quartzo) e assim aumentar o seu valor económico. A Figura 3.1 mostra o circuito geral de exploração e beneficiação, até ao concentrado final.

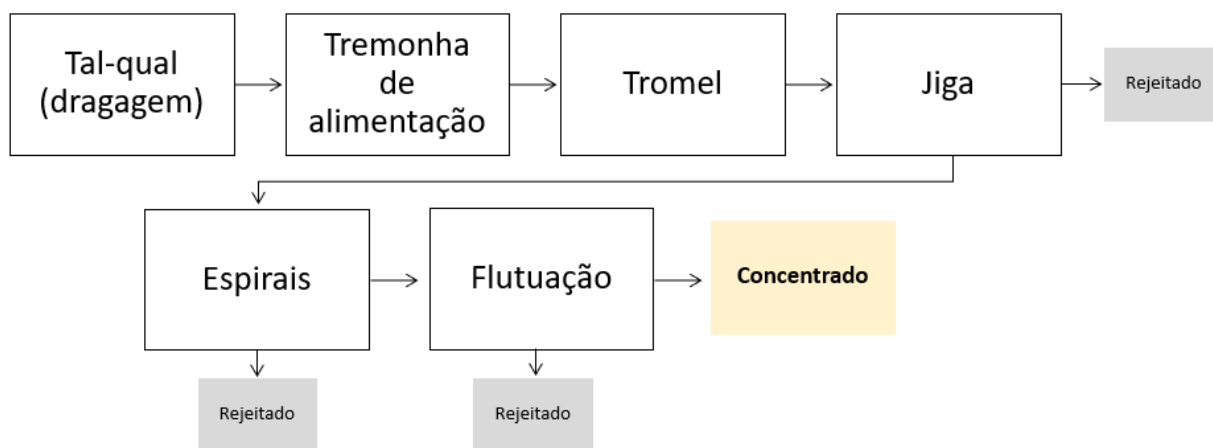


Figura 3.1 - Fluxograma do processo de extração e beneficiação das areias siliciosas da Sifucel

3.1 EXPLORAÇÃO DAS AREIAS

Na mina Via-Vai as areias siliciosas são exploradas a céu-aberto, por dragagem. Este método é vantajoso, primeiro porque a cota de exploração já é inferior à cota de do nível freático, e depois porque facilita o transporte das areias da área de exploração até à central de beneficiação por condutas juntamente com água.

A dragagem é feita por uma draga flutuante semi-automática, equipada com uma bomba de sucção que extraí a areia, e em seguida bombeia o tal-qual através de um sistema de condutas (pipeline) até um depósito à entrada das unidades de crivagem, lavagem e classificação de areia, onde é armazenada e é extraído o excesso de água.

3.2 UNIDADES DE CRIVAGEM, LAVAGEM E CLASSIFICAÇÃO DE AREIA

A empresa Sifucel tem duas unidades de crivagem, lavagem e classificação de areia ligadas em série, de forma a que os produtos que passam na segunda unidade têm ainda maior qualidade. Na primeira unidade a areia é recebida, e são retirados o caulino e os minerais mais pesados, na segunda unidade, a areia é flutuada e o produto final é ainda mais puro. Seguidamente descrevem-se de forma sucinta os principais equipamentos presentes nas unidades de concentração e as suas funções.

3.2.1 LAVAGEM E EXTRAÇÃO DO CAULINO

A retirada do caulino é feita recorrendo a um tromel, hidrociclones e uma bateria de crivos.

3.2.1.1 Tremonha de Alimentação

A tremonha de alimentação encontra-se à entrada da primeira unidade, é um depósito em forma de funil que é carregado através do topo e descarrega através de porta na base. O carregamento da tremonha é feito por pá carregadora a partir de várias pilhas de areia *tal-qual* guardadas no local. A areia armazenada no depósito é transportada por tela até ao tromel que é o primeiro equipamento da unidade.

3.2.1.2 Tromel

O tromel é um equipamento de superfície cilíndrica, que gira em torno de um eixo longitudinal e possui uma ligeira inclinação para permitir o fluxo do material desde um ponto mais alto até um ponto mais baixo. A sua função é ajudar à desagregação de aglomerados de partículas principalmente quando a quantidade de caulino é significativa.

A areia é introduzida juntamente com água na extremidade mais elevada do equipamento, que estando em constante e lenta rotação, promove a desagregação dos aglomerados.

3.2.1.3 Bateria de Crivos

O produto do tromel (água, areia de todas as dimensões e caulino) passa por um sistema de crivos de modo a separar a fração grosseira ($>700\ \mu\text{m}$) que é excluída como rejeitado. Os crivos separam a fração mais fina $< 500\ \mu\text{m}$ que enviam para hidrociclonação, e a fração mais grosseira passa à etapa seguinte.

3.2.1.4 Hidrociclones

A polpa de finos sai da bateria de crivos é passada por hidrociclones que têm o corte ajustado para 40 µm. A fração mais grosseira de areia fina retorna ao circuito, já a fração abaixo de 40 µm é o chamado caulino é decantado e pode ser vendido como sub-produto.

O hidrociclone é um equipamento muito popular em unidades de via húmida, que promove a separação, por ciclonagem, de uma fração fina e mais densa relativamente a uma fracção muito fina e menos densa. Utiliza o princípio da sedimentação centrífuga. Consiste numa câmara cilíndrico-cônica, com uma entrada tangencial por onde entra polpa bombeada, e duas saídas, uma na parte inferior onde sai a fração mais grosseira e outra na parte superior onde sai água mais a fração mais fina (Fuerstenau & Han, 2003). A polpa é injetada sob pressão na câmara do equipamento através de um tubo na parte superior, e como resultado da sua entrada tangencial, é induzido movimento centrífugo das partículas em espiral. As partículas mais densas e com maiores dimensões são arrastadas para a parte mais exterior do vórtice, junto às paredes da câmara, sendo descarregadas por uma abertura na parte inferior do equipamento (“underflow”). As partículas menos densas, de granulometria mais fina e a maior parte da água ficam na parte mais interna do vórtice e saem por uma abertura na parte superior do cilindro (“overflow”) (Carrisso & Correia, 2004; Drzymala, 2007).

Nesta etapa do processamento a areia é separada da fração fina, o caulino. O caulino é por vezes aproveitado, sendo sujeito a processos de desidratação num filtro-prensa e depois em estufas industriais.

3.2.2 SEPARAÇÃO HIDRÁULICA

A separação hidráulica ocorre na primeira unidade e tem por objetivo a remoção dos minerais mais densos do que o quartzo.

3.2.2.1 Jiga

A jiga é um equipamento mecânico de separação hidráulica, funciona pelo princípio da sedimentação, e explora diferenças de densidade e tamanho dos grãos. Existem algumas variantes deste equipamento.

Os que estão instalados na unidade da Sifucel são constituídos por dois compartimentos retangulares, um de menores dimensões que se encontra no interior do compartimento de maiores dimensões. O material a processar é introduzido no compartimento interno, juntamente com

injecção de água a pressão controlada, então as partículas mais densas e de maiores dimensões depositam-se no fundo e as menos densas e finas saem desse compartimento pela parte superior para o compartimento externo.

Existem várias jigas ligadas em série, com caudais gradualmente menores, assim a separação vai extraindo dimensões cada vez mais próximas e/ou de densidades mais parecidas.

3.2.2.2 Espirais

As espirais, também denominadas por Espirais de Humphrey, são o passo seguinte do processamento das areias depois da lavagem. Consistem numa calha com disposição helicoidal em redor de uma coluna central, que têm como principal objetivo separar os grãos por densidades (Arenare, Rodrigues, Araujo, & Viana, 2009).

A polpa é colocada no topo da espiral, e durante a descida pelas calhas as partículas mais densas posicionam-se mais próximo da parede interior da calha e, as menos densas posicionam-se na zona mais exterior.

A separação ocorre devido à ocorrência de dois fluxos distintos durante a descida da areia pela calha, um fluxo primário no sentido descendente e devido à ação da força gravitacional e, um fluxo secundário no sentido transversal à calha que é induzido pela força centrífuga (Arenare et al., 2009; Drzymala, 2007).

3.2.3 SEPARAÇÃO POR FLUTUAÇÃO

A flutuação é um processo físico de separação que explora as diferenças na hidrofobicidade das partículas, isto é, a diferente capacidade de repelir a água. Esta característica raramente é intrínseca dos minerais, pelo que é necessário adicionar um reagente, denominado coletor, para ganharem ou ampliarem essa capacidade (Drzymala, 2007). O coletor varia de acordo com o mineral que se pretende separar.

As células onde ocorre o processo (células de flutuação) são tanques metálicos, onde se adiciona continuamente a mistura de água e areia. Têm um agitador no fundo que também injeta ar, criando bolhas que atravessam toda a mistura, onde os minerais hidrofóbicos vão aderir e ascender até à superfície. Um sistema de pás na parte superior das células remove as partículas que aderem às bolhas de ar (R. Dias, 2015).

Principalmente pelo seu custo, este processo apenas é utilizado em areias cuja finalidade exige uma elevada pureza.

4. MÉTODOS

4.1 AREIAS SILICIOSAS

A areia siliciosa que é explorada pela empresa Sifucel em Rio Maior encontra-se no domínio dos sedimentos e das rochas sedimentares. Segundo Carvalho & Pereira (1974), estas areias são finas e bem calibradas, indicando que sofreram transporte eólico. O vento é o processo mais importante e responsável por este tipo de areia e, para além da função de transporte, executa também um importante papel na sua seleção. Este processo é responsável pela remoção de impurezas, especialmente de minerais pesados e matéria orgânica, bem como da homogeneização granulométrica, quer pela fricção entre grãos, quer pelos de maiores grãos, mais pesados, ficarem pelo caminho (Moura & Velho, 2011).

Estas areias são constituídas quase exclusivamente por quartzo, entre 91 % e 99,2, havendo a ocorrência de outros minerais em menores quantidades, tais como, turmalina, andaluzite, estauroilite, zircão, rútilo, silimanite, granada, anátase, goethite, siderite, ilmenite, hematite, magnetite, bem como, pirite, opala e zeólitos (Carvalho & Pereira, 1974; R. Dias, 2015).

As areias siliciosas têm várias utilizações na indústria, e alguns usos têm restrições muito exigentes relativas a determinadas características e propriedades, tais como a composição química (pureza, teor em sílica e em óxidos de ferro), alcalinidade, matéria orgânica, perda ao rubro, humidade, distribuição granulométrica, forma dos grãos e quantidade em argila (Luz & Lins, 2005).

A composição química tem diversas especificações e requisitos mínimos, que variam de acordo com os diferentes usos industriais. Essas especificações referem-se aos teores de: SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , MnO_2 , MgO , CaO , TiO_2 e ZrO_2 , em casos específicos, devem também ser considerados os teores de Cr_2O_3 , Na_2O e K_2O (Luz & Lins, 2005).

A sílica é o principal componente utilizado na produção de vidro. Esta indústria exige que as areias possuam um elevado teor de quartzo e um baixo teor de impurezas. Os óxidos de ferro provocam alterações na coloração do vidro, e alguns minerais como a ilmenite, cianite, leucoxena e zircão, sendo minerais refratários, aquando da produção do vidro, não fundem ou fundem só parcialmente, originando a ocorrência de partículas escuras (Luz & Lins, 2005).

O vidro ótico (*optical glass*) exige areias siliciosas muito puras, e as exigentes especificações em relação à sua cor e superfície levam a que para a sua produção o teor em quartzo mínimo seja de 99,7 %, possuindo ainda restrições em relação ao valor máximo de Fe_2O_3 , Al_2O_3 e Cr_2O_3 , sendo estes de 0,013 %, 0,2% e 0,00015 %, respetivamente (Platias et al., 2014).

4.2 ANÁLISE MINERALÓGICA

4.2.1 QEMSCAN

O QEMSCAN é um equipamento de identificação mineralógica automático e não destrutivo. É constituído por um SEM (*scanning electron microscope*), um EDS (*energy dispersive X-ray spectrometers*) e por dois módulos, um de *software* e um de *hardware* (ver figura 4.1) Permite obter de forma rápida, fiável e repetível imagens mineralógicas, petrográficas e até metalúrgicas.

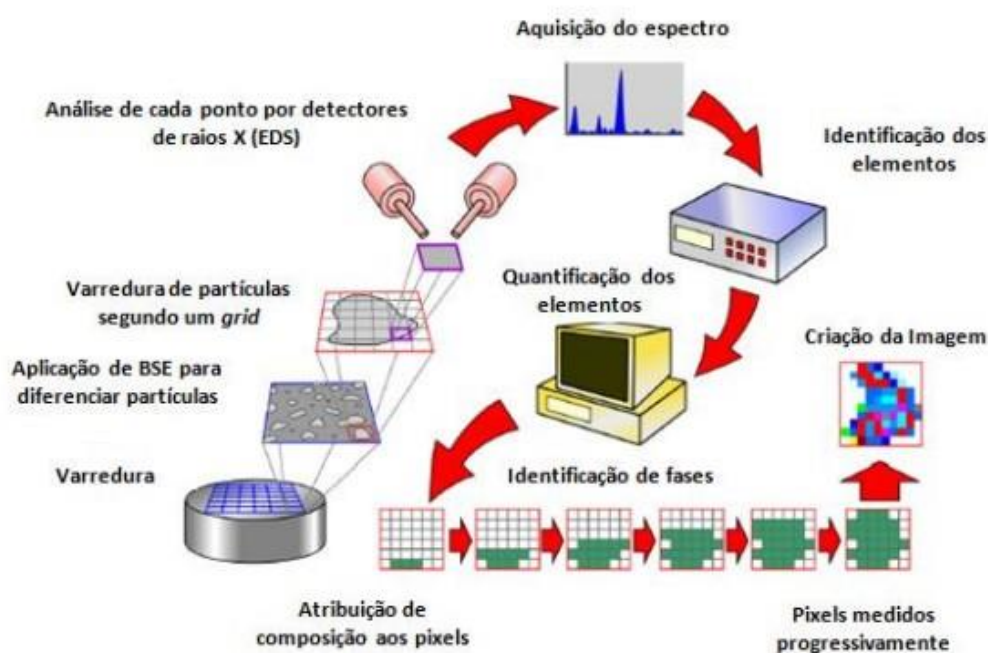


Figura 4.1 - Sequência de análise do QEMSCAN (Jaime, Gottlieb, Butcher, & Dobbe, 2009)

A medição dos BSE (*backscattered-electron*) e dos raios X induzidos emitidos pelos eletrões secundários permite a identificação mineralógica mais provável baseada na composição química (Ayling, Rose, Petty, Zemach, & Drakos, 2012). Inicialmente o sistema diferencia as partículas minerais do fundo por meio de análise através dos backscattered-electron (BSE), sendo pré-definido um limite de brilho para se efetuar tal distinção. Os materiais mais escuros que o limite são classificados como fundo, e os de brilho mais intenso são classificados como partículas minerais. Quando uma partícula individual é localizada o sistema efetua a análise da mesma segundo uma grelha de pontos pré-definida. Os backscattered-electron e os fotões de raios X emitidos de um dado ponto são utilizados para identificar os elementos químicos presentes e classificar a espécie mineral em questão (Gottlieb et al., 2000).

A identificação de um mineral ou fase mineral num ponto é obtida pela comparação do espectro de raios X, registado em cerca de 5 milissegundos, com os dados de uma tabela com minerais e fases minerais definidos pela sua composição química. A comparação dos espectros de raios X é realizada enquanto a medição seguinte é efetuada na amostra, o que permite o processamento de cerca de 100.000 espectros por hora. A lista pré-definida de espécies minerais, conhecida como Programa de Identificação de Espécies (*Species Identification Program - SIP*), pode ser aprimorada ou corrigida. A imagem da seção da partícula é construída ponto a ponto, e cada ponto ou *pixel* é classificado como uma espécie mineral, ou fase. Quando todas as partículas de um determinado campo em análise estão medidas o sistema posiciona o feixe em um novo campo, repetindo o procedimento descrito acima (Ferreira et al., 2013).

Esta forma de identificação mineralógica é fiável exceto quando se tratam de minerais polimorfos (grupos de minerais com composições químicas semelhantes) (Gottlieb et al., 2000). Neste estudo há alguns minerais polimorfos os aluminossilicatos formados pela distena, andaluzite e silimanite, os minerais de titânio, rutilo, anátase e algumas leucoxenas, e os fosfatos, monazite e xenótimo. Por esta limitação do QEMSCAN, doravante os referidos aluminossilicatos vão ser denominados somente por andaluzite, dado se ter observado que este era o mais representativo. Os minerais de titânio irão ser denominados, por rútilo, e pelo mesmo motivo, os fosfatos por monazite.

O equipamento QEMSCAN é utilizado na indústria mineira, para caracterização dos minérios e a chamada dimensão de libertação, na indústria do petróleo e gás, onde é utilizado para reduzir o risco e melhorar a extração, e na indústria do carvão para se caracterizar o potencial calorífico e os resíduos da queima.

Neste trabalho as amostras de areia foram analisadas com um QEMSCAN 10 na empresa Rocktype (Inglaterra). A denominação 10 deve-se à picagem com o espaçamento mínimo de 10 µm. A área de análise mais habitual é um quadrado com 10 por 10 mm, o que perfaz picar um milhão de pontos. Da análise de uma amostra é possível obter-se inúmeras informações, tais como, a imagem da composição mineralógica, a composição modal (histograma de frequências por mineral), a forma dos grãos, a angulosidade e a porosidade no caso de rochas.

Para a análise com o QEMSCAN, a amostra de areia é colocada num molde cilíndrico, e coberta com uma resina de baixa viscosidade. Esta preparação é posteriormente submetida a quase vácuo, de modo eliminar ao máximo a porosidade e as bolhas de ar.

Após o processo de cura, a amostra fica com forma de um disco sólido com 30 mm, que é cortado para permitir que os grãos de areia sejam observados. Em seguida, o disco é polido com uma lixa muito fina, para que a sua superfície fique suave e sem irregularidades. Antes da análise é aplicado um revestimento de carbono na amostra.

4.2.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A difração de raios X, representada pela sigla DRX ou XRD em inglês, é uma técnica clássica que fornece informações amplas quanto à qualificação, caracterização e quantificação dos minerais presentes numa amostra (Gomes, 1988). É uma importante e consolidada técnica analítica, e amplamente utilizada em geologia (Frizado, 1985).

A XRD é uma técnica de análise não destrutiva, rápida e muito versátil, tem apenas como inconveniente não se poder aplicar a minerais não cristalinos ou com cristalinidade incipiente (Gomes, 1988).

Cada espécie mineral tem a sua rede cristalina, isto é, a sua distribuição tridimensional de átomos no espaço. Os átomos estão dispostos numa série de planos paralelos entre si, separados por uma distância d , que varia conforme a espécie de mineral (Terroso, 2005).

Um diagrama XRD (difratograma) mostra o modelo de difração da radiação X nos planos estruturais dessa rede, a partir do qual ela pode ser identificada (Gomes, 1988). Isto acontece, quando um feixe monocromático de raios X de comprimento de onda λ , incide nos planos da rede cristalina com um ângulo θ , variável num determinado intervalo. Ocorre difração, se a distância percorrida pelos sucessivos raios refletidos nos sucessivos planos, diferirem em n comprimentos de onda inteiros, Lei de Bragg (Terroso, 2005).

$$\text{Lei de Bragg: } 2 \sin(\theta) = n\lambda$$

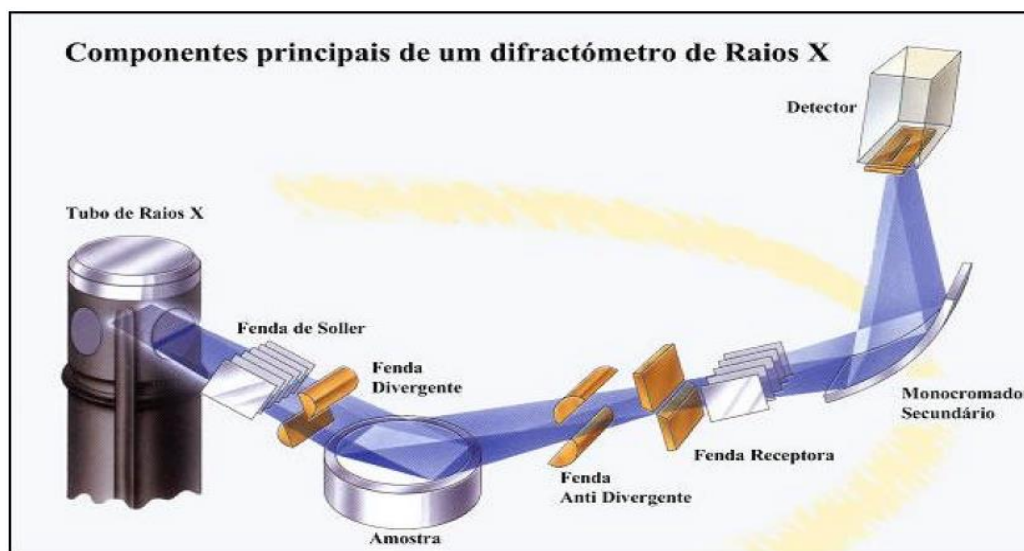


Figura 4.2 - Esquema de funcionamento de um Difratômetro de Raios X (Terroso, 2005)

O difratômetro utilizado nas análises foi um RIGAKU modelo MiniFlex II, equipado com um tubo de cobre (30 KV/15 mA).

4.3 ANÁLISE GEOQUÍMICA

4.3.1 ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

A Espectrometria de Fluorescência de raios X, FRX ou XRF em Inglês, é um meio para a identificação de um elemento através da medição das características das suas ondas raios x, comprimento de onda ou energia (Günzler & Williams, 2008). Esta técnica cada vez mais utilizada devido à sua simplicidade, rapidez e precisão (Gomes, 1988).

O funcionamento do XRF consiste na excitação de todos os elementos químicos presentes na amostra, por um feixe policromático de raios X com energia conveniente, emitindo radiações características ou secundárias ou de fluorescência. Estas radiações são dispersas por cristais adequados de modo a que as radiações características dos elementos possam ser resolvidas e captadas por detetores dos tipos proporcional e cintilações (Gomes, 1988).

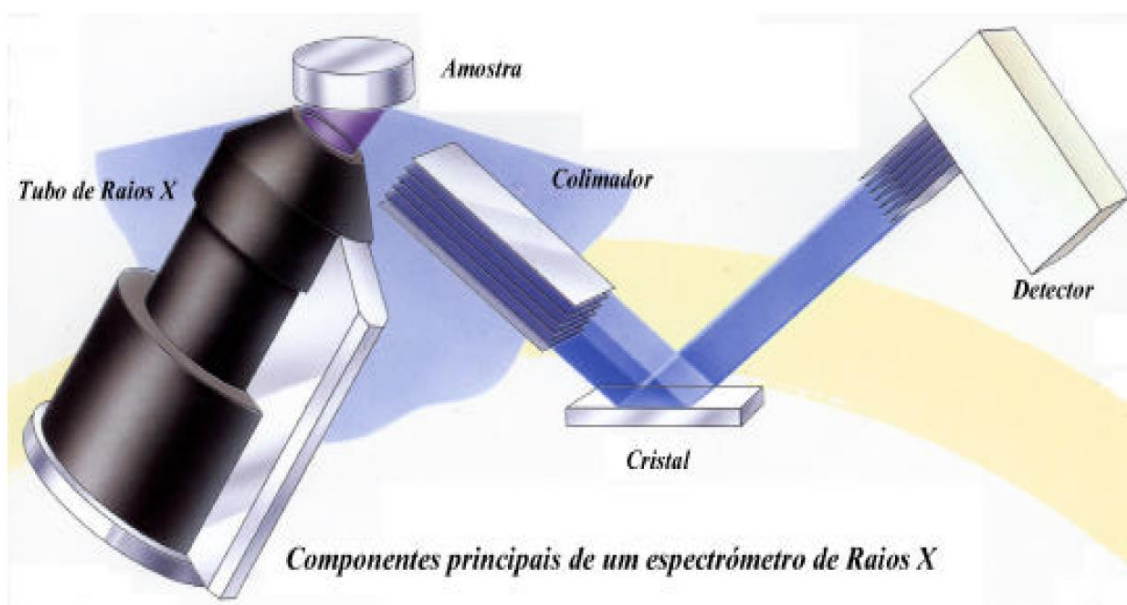


Figura 4.3 - Esquema de Funcionamento de um Espectrômetro de Fluorescência de Raios X (Terroso, 2005)

O XRF não é um método analítico absoluto, a concentração de um elemento é determinada por comparação entre a intensidade da radiação emitida por esse elemento na amostra em estudo e a intensidade da radiação emitida por esse elemento na amostra de referência, que contém o elemento em quantidade conhecida (Gomes, 1988).

5. CASO DE ESTUDO

5.1 AMOSTRAS DE PARTIDA

Para o desenvolvimento do estudo mineralógico e económico da matéria-prima explorada e processada na mina Via-Vai, o Eng. André Filipe da empresa proprietária Sifucel preparou seis amostras e disponibilizou-as no dia 28 de outubro de 2016. As amostras foram escolhidas de forma a cobrirem o produto inicial, o produto final de maior valor acrescentado e alguns produtos intermédios. Na Tabela 5.1 listam-se as designações das amostras, a origem da amostra e as suas massas tal como recebidas, e na Figura 5.1 são identificados, no fluxograma do processo de extração e beneficiação, os locais onde foram recolhidas as amostras. Observa-se que as massas variam entre 3 e 4 kg, aproximadamente, o que corresponde ao que foi solicitado no sentido de ter amostras com uma dimensão representativa face à variedade mineralógica e ao tamanho dos grãos.

Tabela 5.1 – Designações das seis amostras estudadas, origem da amostra e peso

Designação	Origem da amostra	Massa (kg)
S40	À saída da mina (tal-qual)	3,660
SFB	Material mais fino (caulino) proveniente da primeira lavagem	3,203
S40/45	Material mais grosseiro (areia) proveniente da primeira lavagem	3,824
S40/45CF	Rejeitado na central de separação gravítica por espirais (areia com ferro)	4,048
S40/45F	Concentrado da central de flutuação, produto com maior valor acrescentado	3,732
Rejeitado S40/45F	Rejeitado da central de flutuação (areia com ferro)	4,095

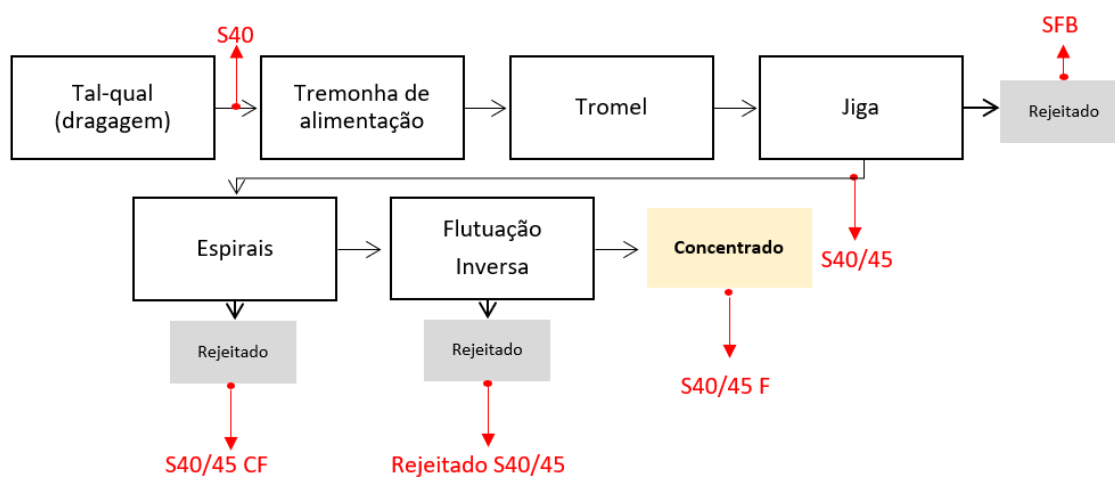


Figura 5.1 – Fluxograma do processo de extração e beneficição, com identificação dos pontos de recolha de amostras.

5.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A análise granulométrica de um qualquer agregado consiste no estudo das dimensões dos grãos que o constituem, sendo comum a apresentação dos resultados sob a forma de uma curva cumulativa (curva granulométrica) que relaciona a dimensão da partícula e a probabilidade ou fração de ocorrência (%).

Em laboratório, a análise granulométrica pode ser feita por um equipamento de difração por laser, por análise e processamento imagem ou por peneiração. No presente estudo, nesta fase inicial fez-se peneiração e, numa fase posterior, fez-se análise e processamento das imagens obtidas pelo QEMSCAN.

Foi determinada a curva granulométrica referente a toda a amostra S40 por peneiração a seco. A amostra S40 foi desumidificada em estufa a 60°, ou seja, até que a massa entre duas pesagens separadas de uma hora se mantivesse constante. A peneiração utilizou um agitador de peneiros e uma série de peneiros de malha quadrada com as dimensões, do topo para a base: 2mm, 1mm, 0,5mm, 0,250mm, 0,125mm e 0,063mm (progressão geométrica de razão 2). O tempo de agitação de cada fração colocada nos crivos foi de 10 minutos. Após a agitação, foram pesadas as frações retidas em cada peneiro mais a fração que passou o peneiro de menor dimensão. Na tabela 5.2 e no gráfico da figura 5.1 apresentam os resultados obtidos da análise granulométrica à amostra S40.

Tabela 5.2 – Resultados da análise granulométrica à amostra S40

Abertura da malha (mm)	Resíduo no peneiro		Passado acumulado (percentagem total de agregado que passa no peneiro)	Retido acumulado (percentagem total de agregado que fica retido no peneiro)
	g	%		
2	0,20	0,005	99,995	0,005
1	6,30	0,173	99,822	0,178
0,5	448,70	12,316	87,506	12,494
0,25	2499,70	68,611	18,895	81,105
0,125	619,10	16,993	1,902	98,098
0,063	63,00	1,729	0,173	99,827
Resto	6,30	0,173	-	-
Total	3643,3	100,00	-	-

Nesta análise importa referir que a peneiração foi feita por via seca, e que por essa razão muito provavelmente as partículas mais finas ter-se-ão mantido agarradas às partículas mais grosseiras e não terão passado para a fração “Resto”.

As areias podem ser classificadas de acordo com a norma ABNT, pela sua dimensão em finas, médias e grosseiras conforme, respetivamente, a fração entre 0,06 e 0,2mm, a está compreendida entre 0,2 mm e 0,6 mm e a que é superior a 0,6 mm. Também se designa por silte a fração abaixo de 60 μm , mas acima de 2 μm e por argila a fração inferior a 2 μm . Esta classificação encontra-se referenciada na

Figura 5.2, sendo a amostra à esquerda da linha vermelha classificada como areia fina, entre a linha verde e vermelha areia média, e à direita da linha verde areia grosseira.

Os resultados mostram que a amostra S40 (produto *tal-qual*) pode ser classificada como uma areia predominantemente de grão fino e que esta designação corresponde a sensivelmente 65 % do material. Também cerca 35 % corresponderão à designação de areia média.

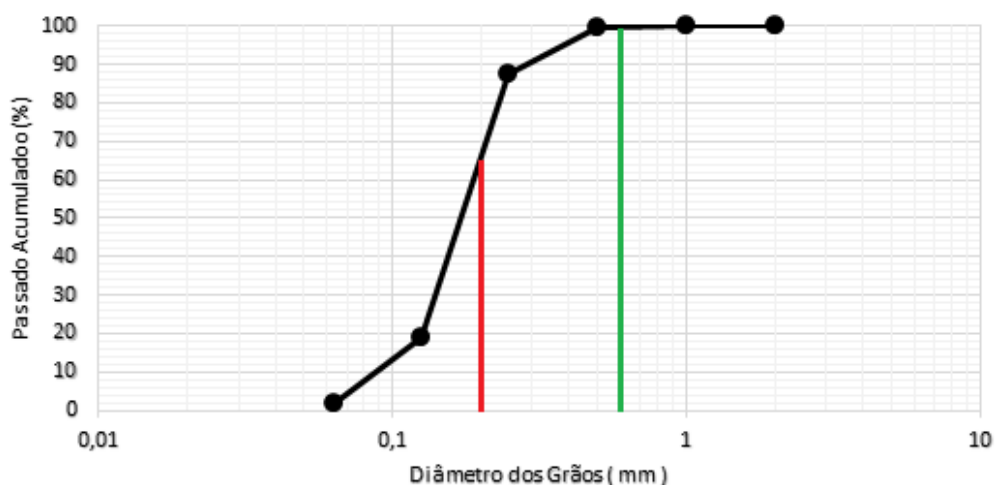


Figura 5.2 – Curva granulométrica da amostra S40

5.3 ANÁLISE INDICATIVA

5.3.1 XRF

A análise pelo método de Espectrometria de Fluorescência de Raios X consistiu em 3 leituras de cerca de 360 segundos para cada amostra com um equipamento de leitura portátil, sendo apresentada na tabela seguinte os valores médios dessas leituras, bem como o desvio padrão das mesmas.

Tabela 5.3 - Resultados obtidos da análise XRF

Amostra/ Elemento	S40		S40/45		SFB		S40/45 F		S40/45 CF		Rejeitado Flutuação	
	Média	σ	Média	σ	Média	σ	Média	σ	Média	σ	Média	σ
Si (%)	36,95	1,058	43,17	0,242	21,56	0,041	43,16	0,075	42,54	0,054	25,50	0,056
Al (%)	0,07	0,003	0,07	0,008	6,03	0,030	0,08	0,004	0,40	0,006	2,43	0,006
P (%)	0,17	0,005	0,18	0,004	0,15	0,022	0,61	0,076	0,77	0,022	0,43	0,010
Fe (%)	0,07	0,001	-	-	0,38	0,003	-	-	0,28	0,001	1,42	0,003
Ti (%)	0,11	0,001	0,01	0,000	0,18	0,001	0,01	0,000	0,37	0,000	0,52	0,002
K (%)	0,04	0,001	0,01	0,001	0,64	0,001	0,01	0,001	0,03	0,003	0,14	0,001
Cl (ppm)	584,45	25,397	462,50	16,556	188,07	5,624	483,55	4,630	485,32	4,406	575,55	12,609
Ca (ppm)	85,35	9,476	56,74	11,546	965,72	15,280	46,01	6,737	55,55	1,890	669,74	9,819
S (ppm)	160,50	37,448	462,50	6,148	134,37	11,983	19,23	27,200	-	-	235,80	5,035
Mg (ppm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	500,35	132,538
W (ppm)	418,72	12,503	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zr (ppm)	128,27	0,650	-	-	103,55	0,540	13,76	0,199	62,66	0,426	80,25	0,582

O silício é o elemento dominante em todas as amostras, sendo o seu valor mais baixo nas amostras SFB (caulino) e rejeitado da flutuação. O alumínio também possui uma representatividade de salientar, especialmente nas amostras SFB e rejeitado da flutuação. Uma significativa ocorrência de fósforo em todas as amostras, cuja proveniência pode ter diversas causas, tais como, a ocorrência do mineral apatite (não detetada noutras análises), ou maior ocorrência de monazite/xenotímo do que o detetado por outros métodos, ou contaminação das amostras. A presença de ferro e titânio especialmente dos rejeitados, SFB, S40/45 CF e rejeitado da flutuação. Também existe a presença de potássio, especialmente na amostra SFB. Por fim, há a presença de alguns elementos menores, tais como cloro, cálcio, enxofre, magnésio, tungsténio e zircónio.

5.4 SEPARAÇÃO SEQUENCIAL DE MINERAIS E BALANÇO DE MASSAS

A separação sequencial de minerais iniciou-se com a preparação de uma subamostra com cerca de 100 g representativa de cada amostra inicial. Para selecionar esta subamostra utilizou-se um divisor Jones.

Em seguida, fez-se passar estas subamostras num separador magnético Frantz (ver figura 5.2a) regulado sucessivamente para três intensidades do campo magnético, sucessivamente, 0,5 Amperes, 1,0 Ampere e 1,5 Amperes. Os minerais que são separados com o campo magnético de 0,5 A ($0,5 \text{ A} \geq \text{Amostra} > 0,0 \text{ A}$) são altamente magnéticos (designação “Alto”), já os que são separados a 1 A ($1,0 \text{ A} \geq \text{Amostra} > 0,5 \text{ A}$) tem suscetibilidade magnética intermédia (“Médio”), e os que são separados a 1,5 A tem baixa suscetibilidade magnética ($1,5 \text{ A} \geq \text{Amostra} > 1,0 \text{ A}$) (“Baixo”). A fração que não é separada no campo magnético a 1,5A é “Não magnética”.

Seguidamente, para a fração não magnética, foi efetuada uma separação gravítica, com auxílio de um líquido denso tungstato ajustado para a densidade de 2,75 (ver figura 5.3b). Os resultados destas separações em percentagens em peso estão apresentados na Tabela 5.4.



Figura 5.3 – a) Separador magnético Frantz b) separação por líquido denso em funil

Tabela 5.4 - Percentagem das frações sucessivamente divididas por separação magnética e separação gravítica

Amostra	Massa (g)	Magnéticos (%)			Não Magnéticos (%)	
		Pouco	Médio	Alto	densidade > 2.75	densidade < 2.75
S40	100,0	0,0	0,0	0,7	0,7	98,6
S40/45	100,0	0,0	0,0	0,0	0,3	99,7
S40/45 CF	100,0	0,1	0,1	2,4	1,8	95,6
Rejeitado S40/45 F	100,0	1,2	0,6	15,3	19,0	63,9
S40/45 F	100,0	0,0	0,0	0,0	0,2	99,8

A amostra S40 ou *tal-qual* apresentou poucos grãos de minerais nas classes pouco e medianamente magnéticos, sendo a sua massa abaixo do limite de medição da balança utilizada. Já a fração de minerais com alta suscetibilidade magnética é significativa e representa 0,7 % da amostra total. Quanto à densidade dos minerais não magnéticos, a sua esmagadora maioria são minerais pouco densos, 98,6 %, havendo apenas 0,7 % de minerais densos.

A amostra S40/45, que é a amostra S40 após lavagem, praticamente não apresentou minerais magnéticos, apenas alguns grãos abaixo do limite de medição da balança. Os minerais não magnéticos são constituídos por 99,7 % de minerais pouco densos e 0,3 % de minerais densos. Esta fração contém certamente minerais densos e minerais magnéticos, mas por uma questão de representatividade em pequenas frações estes não puderam ser totalmente quantificados com rigor.

A amostra S40/45, CF, rejeitado do processo de separação gravítica por espirais, apresenta um total de 2,6 % de minerais com suscetibilidade magnética, sendo que quase a totalidade destes apresenta uma suscetibilidade elevada. Enquanto que os não magnéticos, na grande maioria são pouco densos, 95,6 %, havendo apenas 1,8 % de minerais densos.

O Rejeitado S40/45 F, rejeitado do processo de flutuação, totaliza 17,1% de minerais com suscetibilidade magnética, destacando-se os 15,3 % de minerais com alta suscetibilidade. Os não magnéticos apresentam ainda uma relevante quantidade de minerais densos, muito superior às restantes amostras, de 19,0 %, e somente 63,9 % são pouco densos.

Finalmente, a amostra S40/45 F, que é do concentrado final, apenas apresentou alguns grãos com suscetibilidade magnética, abaixo do limite de medição da balança, e apenas 0,2 % de minerais densos, sendo praticamente a totalidade da amostra constituída por minerais não densos.

Desta separação sequencial levada a cabo em laboratório é possível concluir que os processos de beneficição da areia efetuados pela empresa são eficazes, pois a quantidade de minerais magnéticos e densos vai diminuindo nos produtos ao longo do processo. Podemos também observar que, o processo de flutuação é bem mais eficaz que a separação por espirais, pois 95,6 % da amostra de resíduo das espirais é constituída por minerais não densos que na sua maioria é quartzo, e no rejeitado de processo de flutuação apenas é cerca de 64 %.

É importante referir que os rejeitados dos processos de separação por espirais e principalmente os das células de flutuação são bons para identificar em laboratório a variedade de minerais não quartzo, porque precisamente concentram estes minerais não quartzo numa maior proporção.

5.5 ANÁLISES DO QEMSCAN

5.5.1 RESULTADOS OBTIDOS E INTERPRETAÇÃO PRELIMINAR

Foram analisadas num QEMSCAN 5 amostras de areias (designadas pelas referências r4n-01, r4n-02, r4n-03, r4n-04 e r4n-05), 4 foram preparadas a partir da amostra inicial S40 (separada por intervalos granulométricos e por densidade) e uma a partir da amostra rejeitado da flutuação S40/45 F. A fração abaixo de 63 µm, silte, não foi enviada para análise. A amostra r4n-01 é a fração superior a 63 µm e inferior 125 µm da areia S40 (*tal-qual*), a amostra r4n-02 da fração superior a 125 µm e inferior 250 µm da mesma areia S40, a amostra r4n-03 da fração não densa (< 2,75) superior a 250 µm da areia S40, a amostra r4n-04 da fração densa (> 2,75) superior a 250 µm da areia S40 e a amostra r4n-05 do rejeitado do processo de flutuação.

As figuras 5.4 e 5.5 mostram as imagens mineralógicas obtidas e a respetiva legenda que faz a correspondência entre as cores e os minerais presentes; em particular a figura 5.4 representa os minerais na área (quadrado analisado) e a figura 5.5 representa os grãos que foram encontrados em cada imagem.

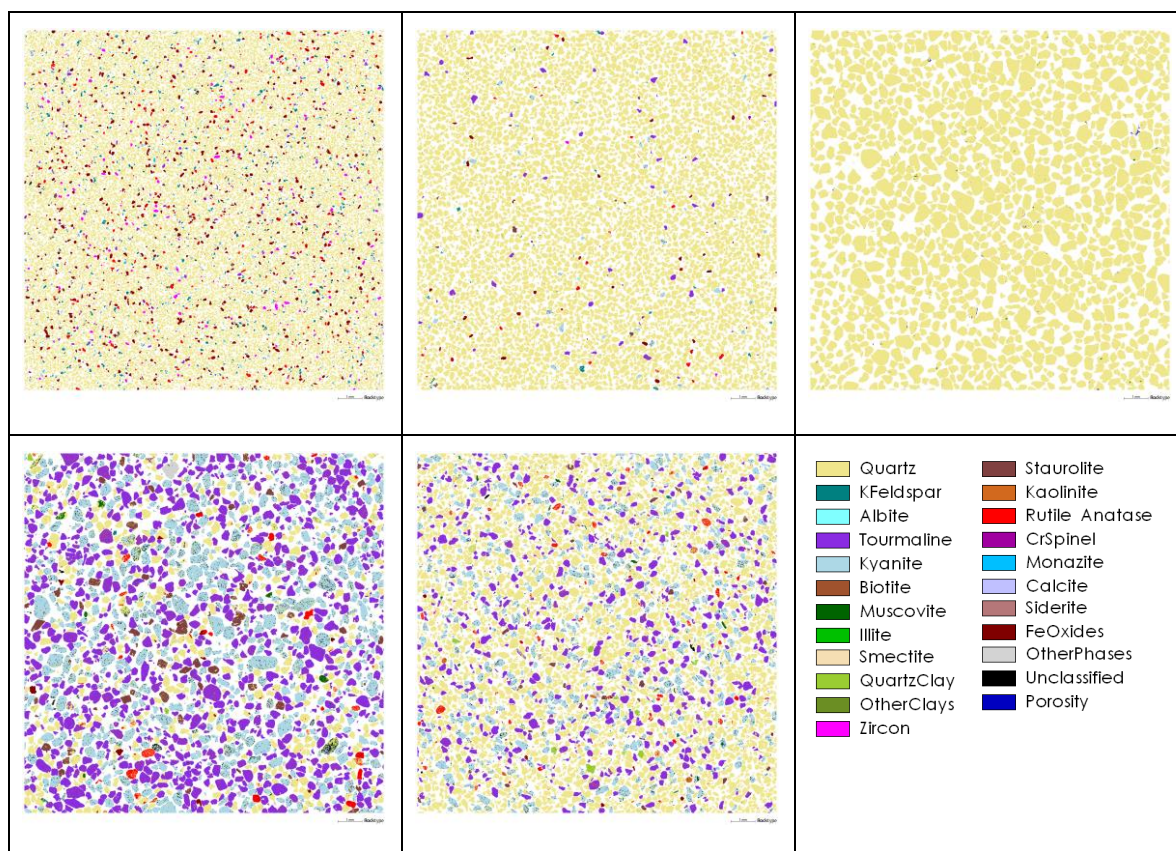


Figura 5.4 - Imagem mineralógica das amostras r4n-01, r4n-02, r4n-03, r4n-04, r4n-05 e legenda de cores dos minerais presentes.

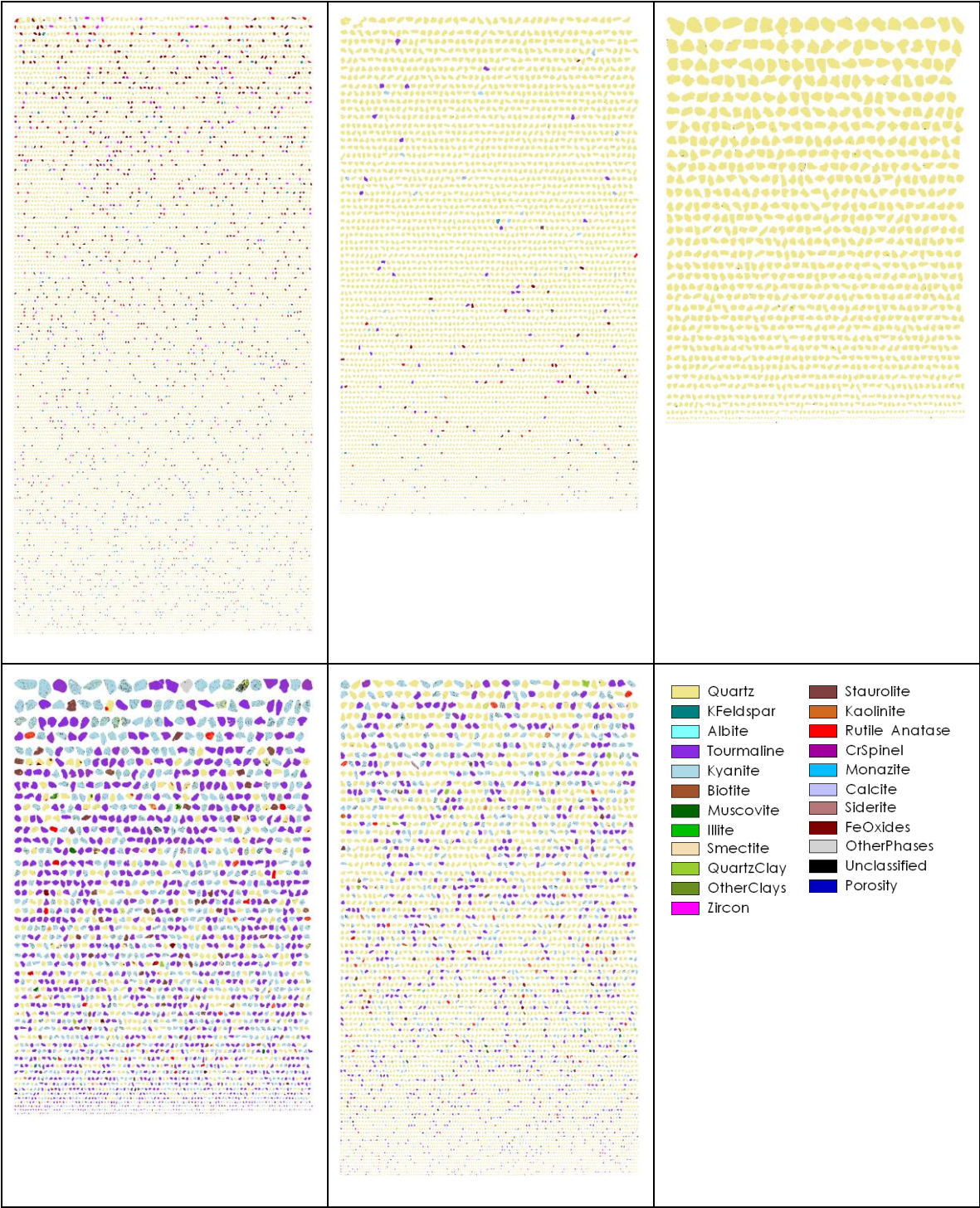


Figura 5.5 - Grãos das amostras r4n-01, r4n-02, r4n-03, r4n-04 e r4n-05 separados e posicionados por dimensão.

Na Tabela 5.5 mostram-se os resultados obtidos pela análise do QEMSCAN em termos da fração de cada variedade mineral identificada no total da amostra analisada. De relembrar que o QEMSCAN não diferencia os minerais polimorfos (minerais com a mesma composição química, mas estruturalmente diferentes), pelo que os aluminossilicatos, distena, andaluzite, silimanite e quiastolite, são apresentados agregados por andaluzite, o mineral mais representativo deste grupo, os óxidos de titânio, rútilo e anátase, serão agregados em rútilo, e os fosfatos, monazite e xenótimo, são agregados em monazite.

Tabela 5.5 – Percentagens de cada mineral identificado nas amostras do QEMSCAN

MINERAIS	S40 Fração 63 µm	S40 Fração 125 µm	S40 Fração 250 µm Não Densos	S40 Fração 250 µm densos	Rejeitado da flutuação
Quartzo	85,67	96,31	99,52	18,05	62,85
Turmalina	0,64	0,91	0,00	37,91	15,09
<i>Andaluzite</i>	1,12	0,75	0,00	32,59	16,22
Óxidos de Ferro	4,68	0,42	0,00	0,32	0,15
Estauroлите	0,30	0,12	0,00	3,00	0,66
Caulinite	0,24	0,15	0,03	2,79	1,39
Feldspato K	2,44	0,17	0,00	0,02	0,12
<i>Rútilo</i>	2,17	0,28	0,00	1,25	0,92
Zircão	1,06	0,02	0,00	0,02	0,02
Argila de Quartzo	0,89	0,60	0,23	0,75	0,93
Moscovite	0,19	0,05	0,04	0,42	0,32
Outras Argilas	0,14	0,04	0,02	0,08	0,05
Cr Espinela	0,08	0,01	0,00	0,00	0,00
Ilite	0,08	0,01	0,01	0,02	0,01
<i>Monazite</i>	0,06	0,00	0,00	0,01	0,00
Esmectite	0,04	0,03	0,01	0,06	0,04
Albite	0,00	0,01	0,01	0,05	0,02
Não classificado	0,12	0,04	0,01	1,88	0,91

Tabela 5.6 - Percentagens de cada mineral identificado nas amostras do QEMSCAN, recalculadas para 100% retirando o mineral quartzo

MINERAIS	S40 Fração 63 µm	S40 Fração 125 µm	S40 Fração 250 µm não densos	S40 Fração 250 µm densos	Rejeitado flutuação
Turmalina	5,23	33,61	0,00	47,12	42,68
<i>Andaluzite</i>	8,58	28,11	0,00	40,41	45,69
Moscovite	0,77	0,22	71,88	0,46	0,69
Óxidos de Ferro	41,12	15,49	0,00	0,38	0,39
<i>Rútilo</i>	17,10	8,72	0,63	1,30	1,63
Caulinite	1,08	2,34	11,88	3,38	3,71
Feldspato K	11,40	4,10	0,00	0,02	0,14
Estauroлите	2,47	4,24	0,00	3,62	1,77
Zircão	9,36	0,84	0,00	0,01	0,04
Outras Argilas	0,29	0,14	7,50	0,05	0,06
Illite	0,22	0,06	5,00	0,01	0,01
Esmeclite	0,03	0,02	3,13	0,05	0,04
Cr Espinela	0,75	0,57	0,00	0,00	0,00
<i>Monazite</i>	0,50	0,02	0,00	0,00	0,00
Albite	0,00	0,04	0,00	0,05	0,04
Siderite	0,03	0,01	0,00	0,01	0,00
Calcite	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Clorite	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
Apatite	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
Não classificado	0,79	1,19	0,00	2,27	2,46

O quartzo é o mineral dominante em todas as amostras, exceto na amostra S40 fração 250 µm densos. Importa ainda referir que a proporção de quartzo é ainda mais elevada nas frações mais grosseiras do que nas frações finas (85,67% na S40 fração 63 µm e 96,31% na fração seguinte 125 µm) sinal de que é mais resistente à erosão, fragmentando-se menos do que os restantes minerais que se concentram nas frações mais finas.

Os outros minerais com maior preponderância são a turmalina e a andaluzite, e quer na amostra S40 Fração 250 μm denso e no rejeitado da flutuação apresentam valores relevantes, na ordem dos 30-40% na primeira e 15-16% na segunda. De salientar, que possivelmente esta constituição se deve a estas amostras serem “resíduo”, tendo dessa forma uma quantidade de quartzo menor, o que levam a um aumento da percentagem dos restantes minerais. A ocorrência de cerca de 18% em quartzo na fração densos, pode ser devida a alguns grãos terem sido arrastados aquando da separação com o líquido denso e também tratem-se de partículas mistas.

Observam-se também alguns valores relevantes na S40 Fração 63 μm , quase 5% de óxidos de ferro, cerca de 2% de feldspato potássico e 1% de rútilo. As percentagens destes minerais diminuem bastante nas amostras com grãos maiores, isto deve-se muito provavelmente devido a serem menos resistentes aos agentes externos que o quartzo.

Destacam-se ainda as argilas de quartzo e a moscovite com valores próximos de 1%, para as frações mais finas notando que estes valores diminuem para as frações mais grosseiras.

Os restantes minerais presentes apresentam valores residuais, abaixo de 0,25%. De salientar alguns minerais não classificados nas amostras de S40 Fração 250 μm denso e no rejeitado da flutuação cerca de 2% e 1%, respetivamente.

Na Tabela 5.6 são apresentados os resultados da análise QEMSCAN recalculados sem o quartzo, para realçar a importância dos restantes minerais presentes nas amostras.

Apenas as amostras S40 fração 63 μm e S40 fração 250 μm não densos apresentam um constituinte principal, óxidos de ferro e moscovite, respetivamente. As restantes amostras apresentam mais do que um mineral principal, na S40 fração 125 μm , S40 Fração 250 μm densos e rejeitado da flutuação a constituição é essencialmente turmalina e andaluzite, cada amostra possui percentagens muito semelhantes destes dois minerais.

A ocorrência de óxidos de ferro apenas acontece nas duas amostras de fração mais reduzida, o rútilo, zircão e feldspato potássico também apresentam uma redução significativa com o aumento da granulometria. Relação contrária tem a andaluzite e a turmalina, apresentando-se em menores quantidades quando a granulometria é menor, e em maior quando esta também é maior.

5.5.2 ANÁLISE E PROCESSAMENTO ESTATÍSTICO DAS IMAGENS QEMSCAN

Neste ponto fez-se o processamento estatístico dos resultados das imagens geradas pela análise QEMSCAN, tendo-se utilizado o software de cálculo estatístico “R”. Dado que se pretende relacionar com a maior representatividade possível os minerais presentes, optou-se por conduzir esta análise às amostras com as maiores frações de minerais não quartzo que são as r4n-04 e r4n-05.

Para efetuar esta análise estatística de dados construíram-se duas tabelas multivariadas de indivíduos e propriedades, uma para cada das imagens mencionadas r4n-04 e r4n-05. Nestas tabelas os indivíduos são os grãos, as propriedades os principais minerais encontrados e os valores são a contagem do número de células que pertencem a cada mineral / grão.

As ferramentas bi e multivariadas utilizadas foram a matriz de correlações de Pearson e Spearman, a Classificação Ascendente Hierárquica (CAH) (Yim & Ramdeen, 2015) e a Análise em Componentes Principais (ACP) (Hongyu, Sandanielo, & Junior, 2015).

A ACP é uma técnica que transforma uma tabela multivariada de dados de partida numa nova tabela de dados, que sintetiza a informação de partida num menor conjunto de variáveis designadas por componentes principais, não correlacionadas entre si, e que contém uma parte significativa da informação da tabela original. Já a CAH é um algoritmo de classificação automática que pretende agrupar indivíduos de acordo com a similitude (ou dissimilitude) das suas características (propriedades). Após várias tentativas utilizou-se a distância euclidiana como medida de dissimilitude e a técnica de agrupamento Ward para separar as amostras em grupos.

A estratégia utilizada foi executar a CAH para identificar grupos de grãos conforme a sua composição mineralógica e depois executar a ACP para interpretar a relação entre as ocorrências minerais e também entre estas e o tamanho dos grãos. Sobre os gráficos das projeções da ACP representaram-se então os grupos provenientes da CAH.

5.5.2.1 Resultados para a amostra r4n-04

A amostra r4n-04, S40 Fração 250 μm densos, é constituída por 2567 grãos. Selecionaram-se como estando presentes e com significado os seguintes 9 minerais (por ordem de abundância): turmalina, andaluzite, quartzo, estauroлите, caulinite, não classificado (NaoClass), rútilo, moscovite e óxidos de ferro (Ox.Fe).

A primeira representação é uma matriz de coeficientes de correlação entre os minerais presentes grão a grão. Os resultados podem ser vistos na Tabela 5.7, onde a fundo amarelo destacam-se os valores mais significativos.

Tabela 5.7 – Matriz de coeficientes de correlação de Pearson (metade inferior) e Spearman (metade superior) para as ocorrências minerais por grão.

	Turmalina	Andaluzite	Quartzo	Estauroлите	Caulinite	NaoClass	Rútilo	Moscovite	Ox.Fe
Turmalina	1,000	-0,420	-0,410	0,122	0,793	-0,371	-0,146	-0,091	-0,102
Andaluzite	-0,204	1,000	-0,081	0,186	-0,178	0,883	0,140	0,321	0,302
Quartzo	-0,210	-0,110	1,000	-0,062	-0,280	-0,023	0,199	0,175	0,097
Estauroлите	-0,066	-0,050	-0,026	1,000	0,257	0,199	0,092	0,149	0,231
Caulinite	0,769	-0,073	-0,139	-0,011	1,000	-0,117	-0,001	0,104	0,025
NaoClass	-0,143	0,596	0,003	-0,035	0,036	1,000	0,198	0,336	0,333
Rútilo	-0,054	-0,034	0,067	-0,014	-0,025	0,012	1,000	0,205	0,404
Moscovite	-0,032	0,039	0,041	-0,008	0,033	0,055	-0,006	1,000	0,232
Ox.Fe	-0,036	0,012	0,031	0,016	-0,025	0,015	0,039	-0,003	1,000

As correlações mais significativas ocorrem para os pares de minerais caulinite/turmalina e andaluzite/NaoClass, sendo de destacar o primeiro par de minerais. Para confirmar estes valores apresentam-se os respetivos diagramas de dispersão.

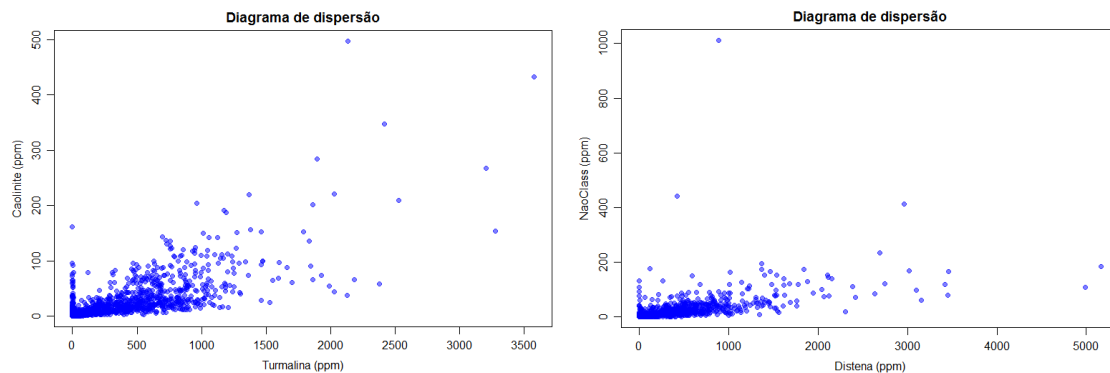


Figura 5.6 – Diagramas de dispersão dos valores relativos aos minerais turmalina / caolinite e andaluzite / não classificado. As unidades são em número de pontos por mineral e por grão.

Executou-se então a CAH mencionada e o dendrograma desta tabela encontra-se na Figura 5.7. Optou-se por gerar 5 grupos principais, que são os que melhor refletem as tipologias dos grãos presentes. Na Tabela 5.8 mostram-se os 5 grupos com a proporção dos minerais mais relevantes.

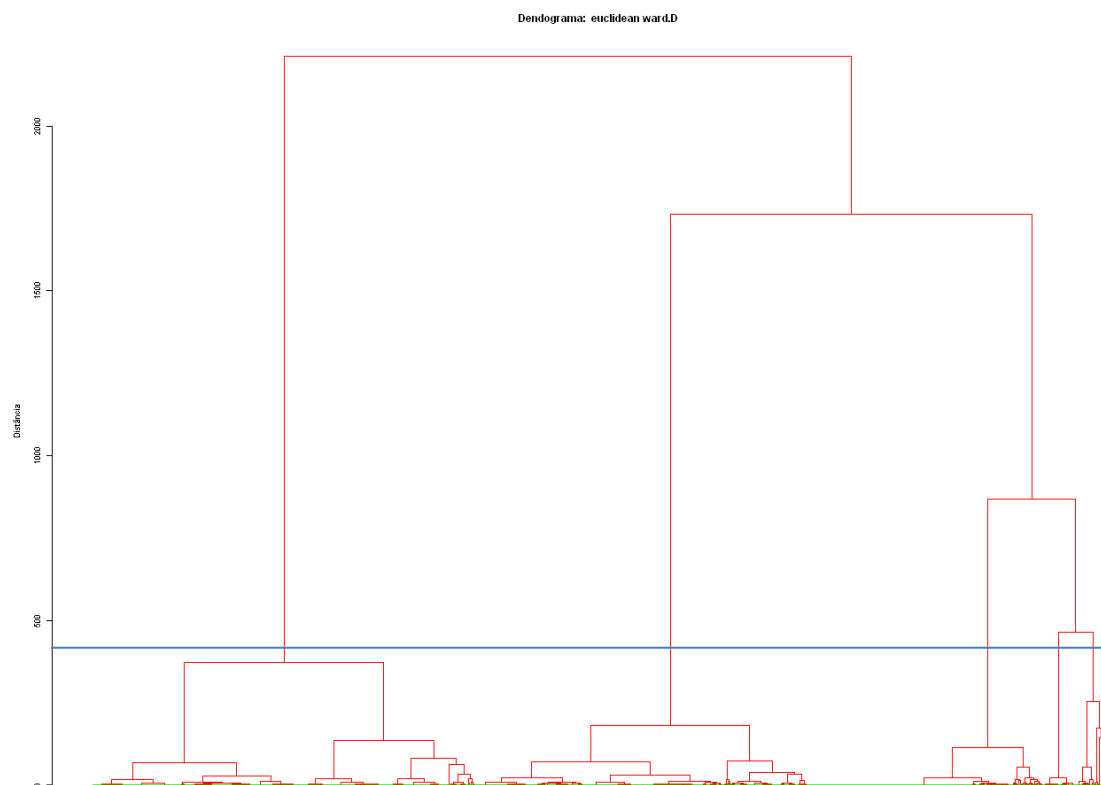


Figura 5.7 - Dendrograma relativo à tabela de dados da amostra r4n-04 com identificação dos 5 grupos (linha horizontal a azul)

O número de grupos foi definido de forma a cada um dos 5 grupos ser caracterizado por um mineral, o número inferior ou superior de grupos a este, leva a que este pressuposto não se verifique e cada grupo seja caracterizado por mais do que um mineral.

Tabela 5.8 – Tabela descritiva dos 5 grupos de grãos que foram identificados com a CAH, valores em proporção relativa.

Grupo	#	Turmalina	Andaluzite	Quartzo	Estaurolite	Caulinite	NaoClass	Rutilo	Moscovite	Ox.Fe
1	968	0,928	0,001	0,007	0,001	0,062	0,000	0,000	0,001	0,000
2	596	0,013	0,023	0,944	0,001	0,004	0,002	0,006	0,005	0,002
3	843	0,002	0,907	0,023	0,001	0,008	0,053	0,001	0,002	0,002
4	69	0,000	0,015	0,161	0,000	0,014	0,126	0,503	0,069	0,112
5	88	0,004	0,000	0,059	0,921	0,011	0,000	0,001	0,000	0,003

Pela CAH foram definidos 5 grupos, o mineral que caracteriza o grupo 1 é a turmalina, que representa mais de um terço da amostra. O grupo 2 é caracterizado por quartzo, que representa quase um quarto da amostra. Enquanto que o grupo 3, representando aproximadamente um terço da amostra, é definido pela andaluzite. Por sua vez, o grupo 4, cuja representatividade é de cerca de 3 %, é caracterizado pelo rutilo. Por fim, a estaurolite é o mineral representativo do grupo 5, que tem um peso na amostra pouco superior ao grupo 4.

Seguidamente, e também com o objetivo de caracterizar as associações minerais e os grupos gerados na CAH executou-se a ACP. Os resultados estão nas figuras seguintes.

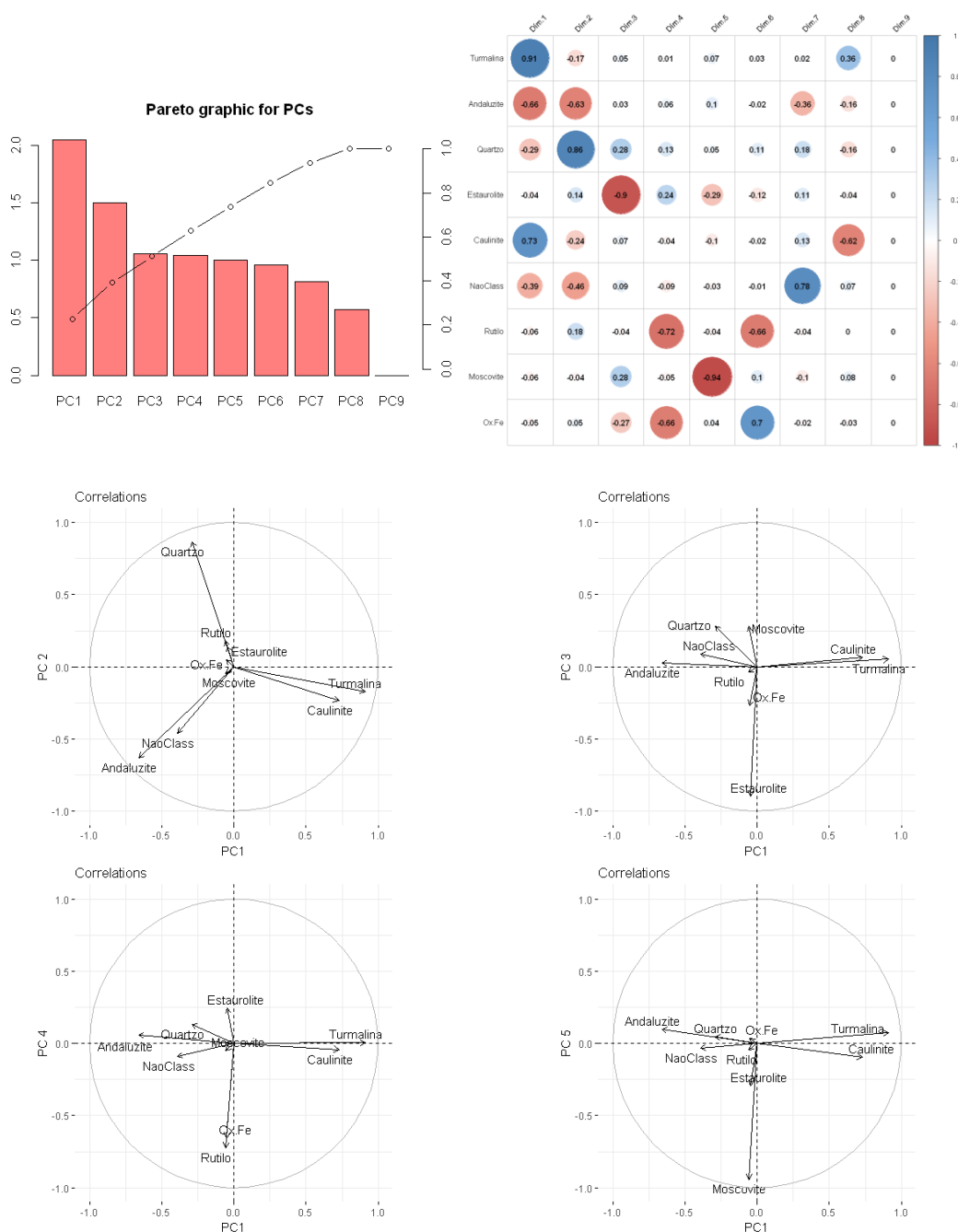


Figura 5.8 - Representação gráfica ACP da amostra r4n-04: pesos das componentes principais, matriz de correlação entre as variáveis de partida e as componentes principais e gráfico de projeção das propriedades nas CP12, CP13, CP14 e CP15.

Os gráficos acima confirmam os resultados obtidos através da análise bivariada, verificando-se a associação caulinite/turmalina e andaluzite/não classificado, como podemos visualizar nos exemplos da Figura 5.9. Além destas associações, é possível verificar que o quartzo e moscovite

ocorrem quase sempre no estado puro, e que o rútilo e os óxidos de ferro também costumam aparecer associados.

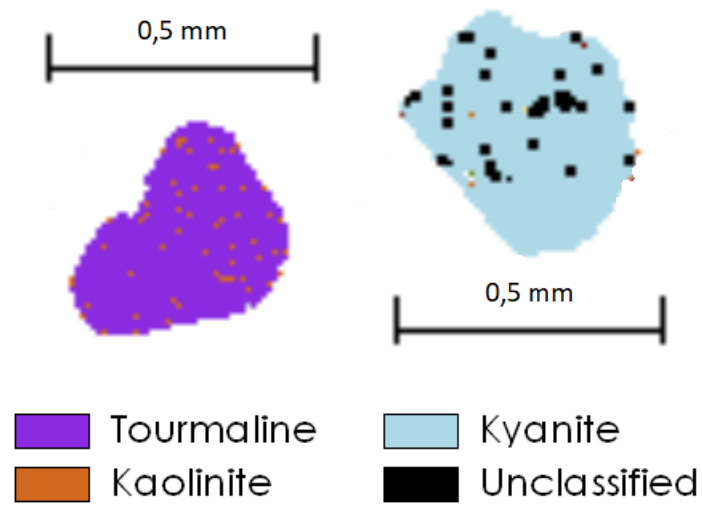


Figura 5.9 - Exemplos de associações minerais da amostra na imagem do QEMSCAN:
a) turmalina/caulinite b) andaluzite (kyanite)/não classificado

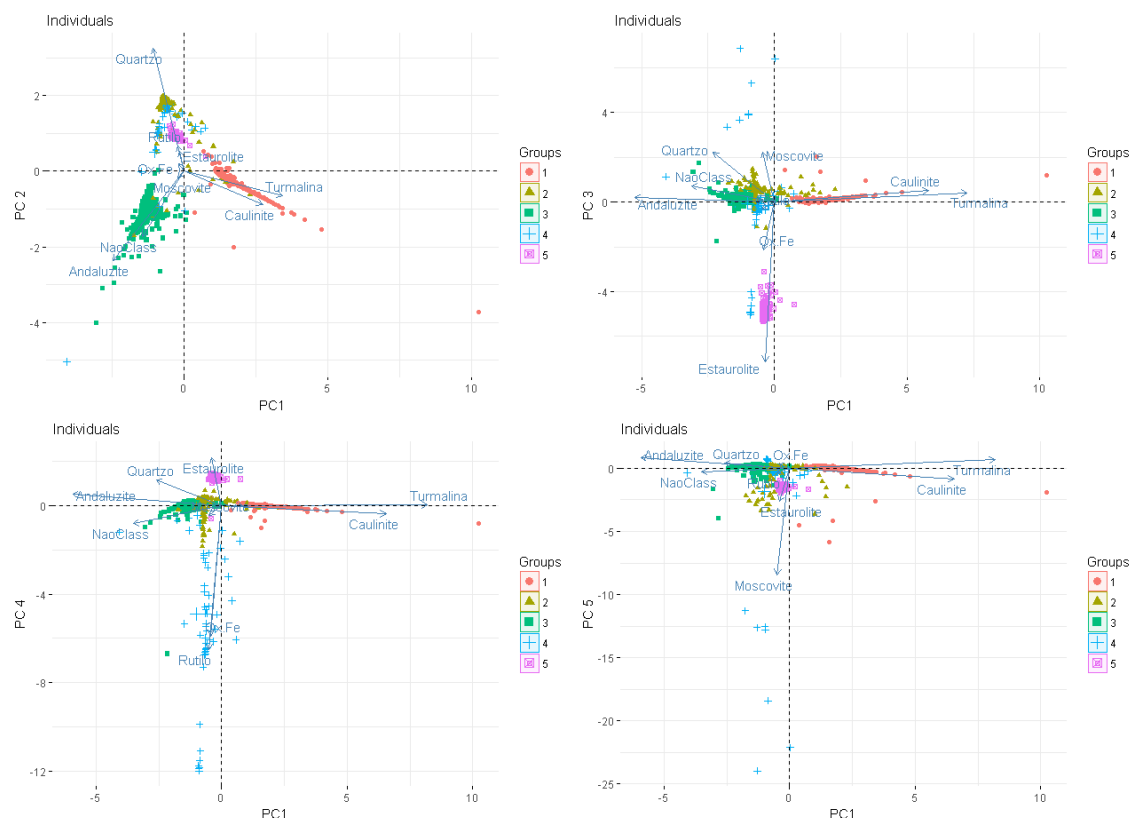


Figura 5.10 - Representação gráfica ACP da amostra r4n-04: gráfico de projeção dos indivíduos nas CP12, CP13, CP14 e CP15 e sobreposição dos 5 grupos propostos.

A tabela de partida contém 9 variáveis e por isso são obtidas 9 CP. A correlação entre as variáveis é como já foi estudado baixa, por isso a informação nas primeiras CP não é muito significativa.

O gráfico CP1/CP2 concentra a informação dos minerais turmalina, quartzo, caulinite, não classificado e andaluzite. Por sua vez, o gráfico CP1/CP3 concentra a informação dos minerais turmalina, caulinite e estaurolite. Já o gráfico CP1/CP4 tem informação de turmalina, caulinite, rútilo e óxidos de ferro. Finalmente o gráfico CP1/CP5 tem informação de turmalina, caulinite e moscovite.

Nesta figura podemos observar que os grãos de quartzo (grupo 2), no gráfico CP1/CP2, se encontram muito mais concentrados que os grãos dos grupos da turmalina/caulinite e andaluzite/não classificado, verificando-se que o quartzo se apresenta geralmente na forma monomineral.

5.5.2.2 Resultados para a amostra r4n-05

A amostra r4n-05, rejeitado da flutuação, é constituída por 6068 grãos. Selecionaram-se como estando presentes e com significado os seguintes 9 minerais: quartzo, andaluzite, turmalina, caulinite, rútilo, não classificado (NaoClass), estauroлите, moscovite e óxidos de ferro (Ox.Fe).

Novamente, a primeira representação é uma matriz de coeficientes de correlação entre os minerais presentes grão a grão. Os resultados podem ser vistos na Tabela 5.9, onde a fundo amarelo destacam-se os valores mais significativos.

Tabela 5.9 – Matriz de coeficientes de correlação de Pearson (metade inferior) e Spearman (metade superior) para as ocorrências minerais por grão na amostra r4n-05.

	Quartzo	Andaluzite	Turmalina	Caulinite	Rútilo	NaoClass	Estauroлите	Moscovite	Ox.Fe
Quartzo	1.000	-0.436	-0.471	-0.435	-0.057	-0.374	-0.221	-0.082	-0.131
Andaluzite	-0.176	1.000	-0.018	0.213	0.133	0.846	0.181	0.282	0.280
Turmalina	-0.179	-0.071	1.000	0.694	-0.014	-0.006	0.210	0.041	0.056
Caulinite	-0.114	0.010	0.523	1.000	0.137	0.231	0.268	0.239	0.133
Rútilo	-0.005	-0.019	-0.023	0.019	1.000	0.165	0.050	0.200	0.306
NaoClass	-0.139	0.737	-0.059	0.038	-0.004	1.000	0.175	0.279	0.304
Estauroлите	-0.042	-0.008	-0.014	0.002	-0.006	-0.009	1.000	0.100	0.184
Moscovite	-0.036	0.136	-0.013	0.036	0.060	0.193	-0.007	1.000	0.141
Ox.Fe	-0.035	0.040	-0.014	-0.005	0.038	0.030	0.005	0.008	1.000

As correlações mais significativas ocorrem para os pares de minerais caulinite/turmalina e andaluzite / NaoClass, sendo de destacar o segundo par de minerais. Os diagramas de dispersão são do mesmo género dos já apresentados para a amostra rn4-04.

Executou-se então a CAH mencionada e o dendrograma desta tabela encontra-se na Figura 5.11. Optou-se por gerar 3 grupos principais, que são os que melhor refletem as tipologias dos grãos presentes. Na Tabela 5.8 mostram-se os 3 grupos com a proporção dos minerais mais relevantes. Foram feitas tentativas de gerar mais grupos, todavia observou-se que os grupos que eram gerados não eram indicadores de nenhum mineral em especial.

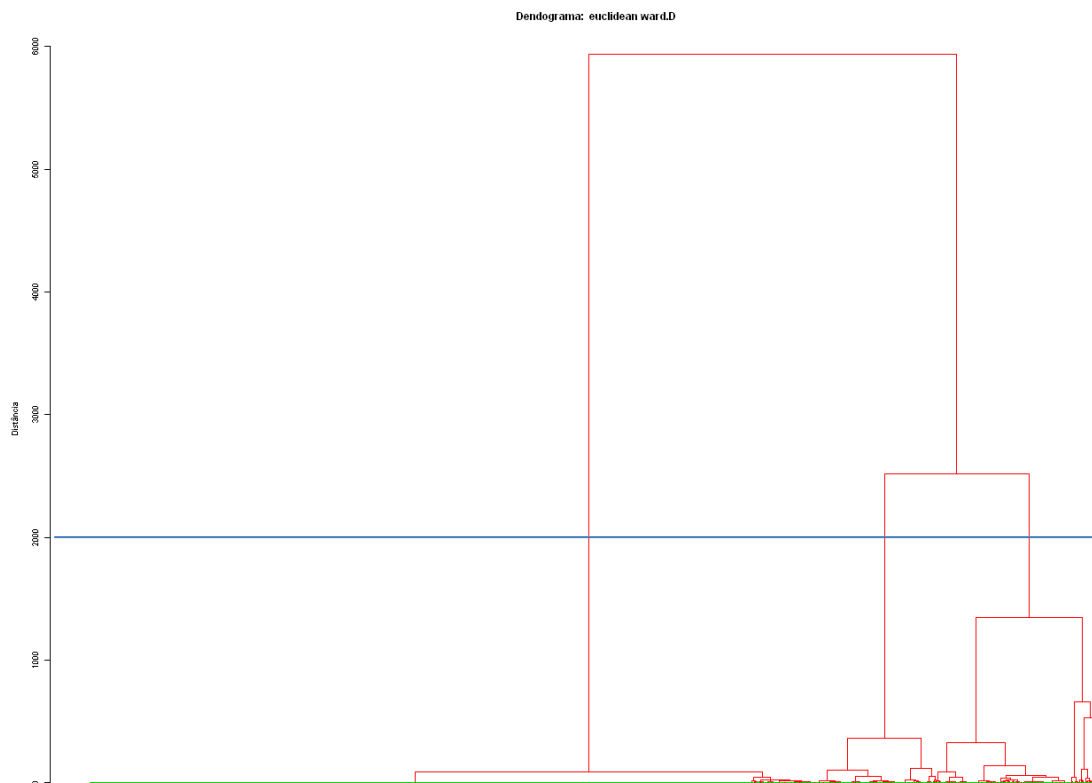


Figura 5.11 - Dendrograma relativo à tabela de dados da amostra r4n-05 com identificação dos 3 grupos (linha horizontal a azul)

O número de grupos foi definido de forma a cada um dos 3 grupos ser caracterizado por um mineral, o número inferior ou superior de grupos a este, leva a que este pressuposto não se verifique e cada grupo seja caracterizado por mais do que um mineral.

Tabela 5.10 – Tabela descritiva dos 3 grupos de grãos que foram identificados com a CAH, valores em proporção relativa.

Grupo	#	Quartzo	Andaluzite	Turmalina	Caulinite	Rútilo	NaoClass	Estaurolite	Moscovite	Ox.Fe
1	992	0,062	0,731	0,001	0,016	0,061	0,049	0,045	0,025	0,012
2	4348	0,997	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
3	711	0,008	0,001	0,922	0,068	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000

A presente amostra foi dividida em três grupos, o primeiro desses grupos, que representa cerca de 16% da amostra, é caracterizado pela andaluzite. Enquanto que o grupo 2, o mais representativo da amostra ($\approx 72\%$) é definido pelo quartzo. Por fim, o grupo 3 é caracterizado por turmalina e possui uma representatividade de aproximadamente 12 %.

Seguidamente, e também com o objetivo de caracterizar as associações minerais e os grupos gerados na CAH executou-se a ACP. Os resultados estão nas figuras seguintes.

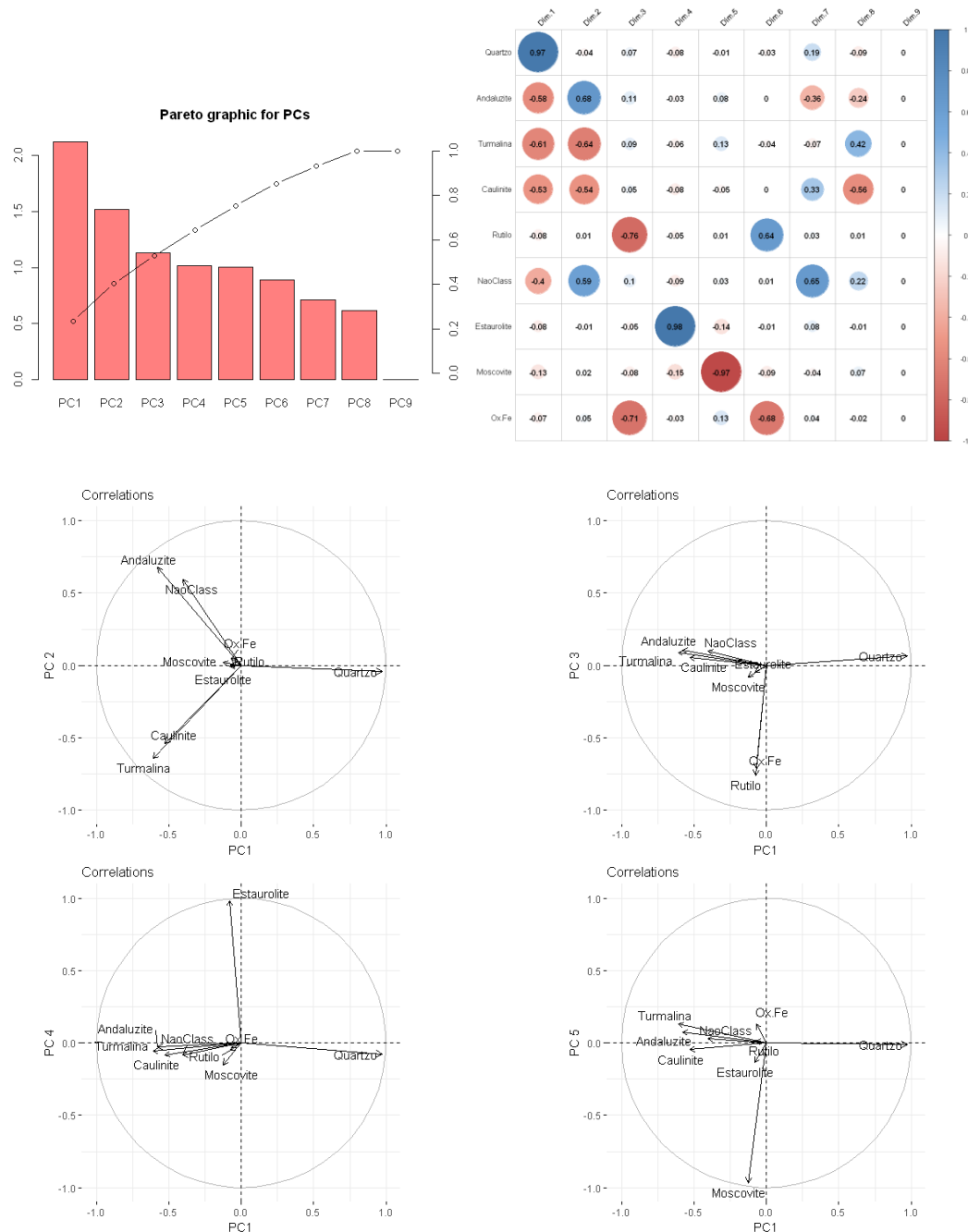


Figura 5.12 - Representação gráfica ACP da amostra r4n-05: pesos das componentes principais, matriz de correlação entre as variáveis de partida e as componentes principais e gráfico de projeção das propriedades nas CP12, CP13, CP14 e CP15.

Os gráficos confirmam os dados obtidos na análise bivariada, confirmando-se associações turmalina/ caulinite e andaluzite/ não classificado, que podemos visualizar nos exemplos da Figura 5.13. Além destas, é possível verificar uma associação, embora que mais fraca, entre o rútilo/ óxidos de ferro. Verifica-se também que, geralmente, o quartzo e a moscovite ocorrem no estado puro.

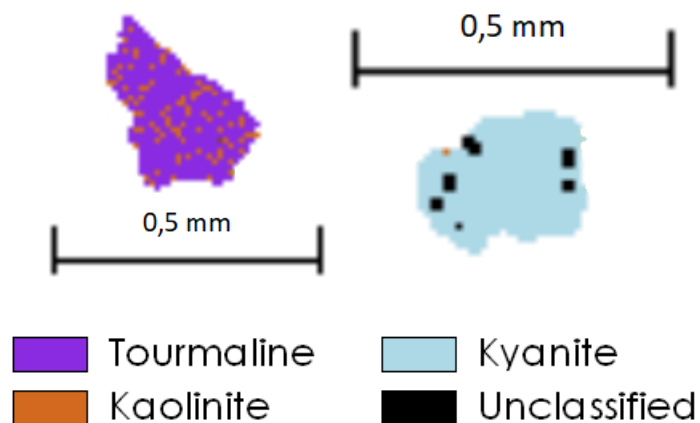


Figura 5.13 - Exemplos de associações minerais da amostra na imagem do QEMSCAN:
a) turmalina/caulinite b) andaluzite (kyanite)/não classificado

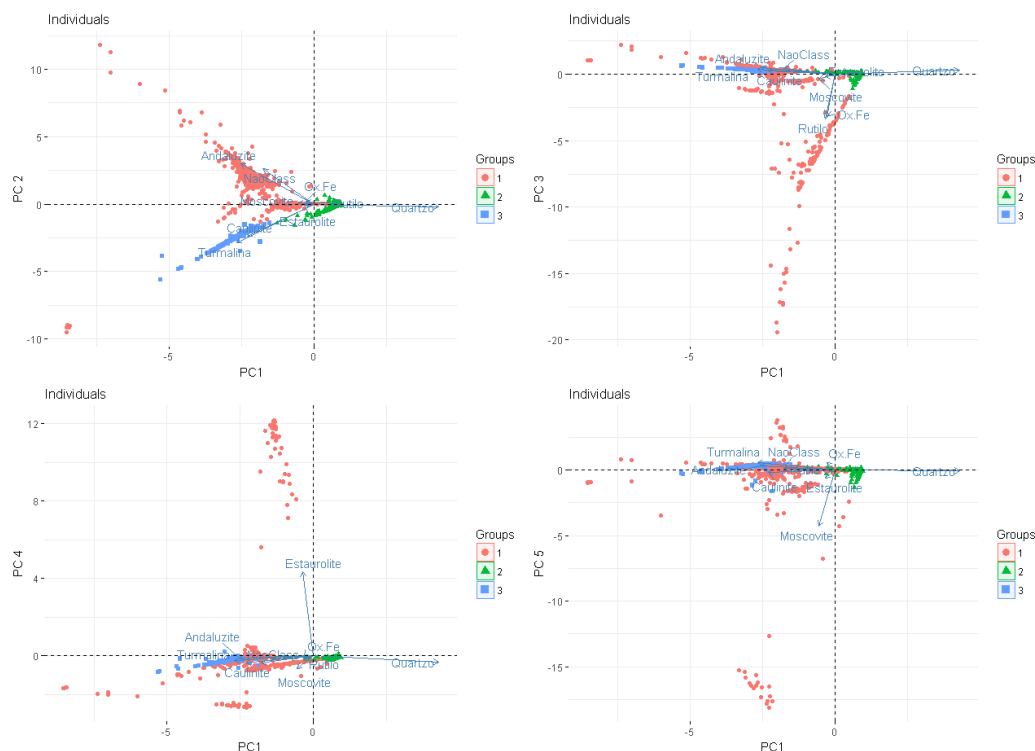


Figura 5.14 - Representação gráfica ACP da amostra r4n-05: gráfico de projeção dos indivíduos nas CP12, CP13, CP14 e CP15 e sobreposição dos 3 grupos propostos.

A tabela de partida contém 9 variáveis e por isso também são obtidas 9 CP. A correlação entre as variáveis é como já foi estudado baixa, por isso a informação nas primeiras CP não é muito significativa.

O gráfico CP1/CP2 concentra a informação dos minerais quartzo, andaluzite, não classificado, turmalina e caulinite. Por sua vez, o gráfico CP1/CP3 concentra a informação dos minerais quartzo, rutilo e óxidos de ferro. Já o gráfico CP1/CP4 tem informação de quartzo e estauroilite e finalmente o gráfico CP1/CP5 tem informação de quartzo e moscovite.

Nesta figura podemos observar que os grãos de quartzo (grupo 2), em qualquer um dos gráficos, se encontram muito mais concentrados que os grãos dos grupos da turmalina/caulinite e andaluzite/não classificado, verificando-se que o quartzo se apresenta geralmente na forma monomineral.

Em resumo, a homogeneidade das amostras r4n-01, r4n-02 e r4n-03 levou a que apenas fossem alvo de análise e processamento estatístico as restantes duas amostras. Nessas duas amostras foi possível verificar a existência de duas associações minerais, com uma maior relevância, turmalina/caulinite e andaluzite/não classificado. Além disso, verificou-se uma associação com menor relevância, rutilo/ óxidos de ferro. Enquanto que o quartzo e a moscovite se encontram quase na totalidade dos casos no estado puro, isto é, os seus grãos são monominerais.

5.6 ANÁLISES COMPLEMENTARES

5.6.1 XRD

As amostras selecionadas para análise no XRD, estão descritas na Tabela 5.11. Estas foram selecionadas a partir da amostra inicial (S40 ou tal-qual), à exceção da amostra 5 que representa o rejeitado do processo de flutuação.

Tabela 5.11 - Descrição amostras analisadas no XRD;

Amostra	Densidade	Magnetismo
1	$\leq 2,75$	x
2	$> 2,75$	x
3	x	$0,0 \text{ A} < \text{Amostra} \leq 0,5 \text{ A}$
4	x	$0,5 \text{ A} < \text{Amostra} \leq 1,0 \text{ A}$
5	Rejeitado da flutuação	x

Na tabela seguinte são apresentados os resultados obtidos através da análise do XRD.

Tabela 5.12 - Resultados obtidos da análise do XRD;

Amostra/ Mineral	1	2	3	4	5
Quartzo	100	49	58	x	84
Andaluzite	x	50	39	x	12
Turmalina	x	x	x	100	2
Rútilo	x	x	2	x	x

A amostra 1, minerais não densos e não magnéticos, apresenta 100 % de quartzo, muito próximo do valor obtido no QEMSCAN (99,52%). A amostra 2, minerais não magnéticos densos, é constituída por 49 % quartzo e 50 % andaluzite, como esperado houve uma diminuição do valor de quartzo, justificado pelos grãos com inclusões ou partículas mistas. A amostra 3, minerais altamente magnéticos, 39 % de andaluzite e 2% de rútilo e valor superior ao esperado de quartzo, 58 %, este valor anómalo deve-se provavelmente a problemas de eficiência no equipamento de separação magnética, provavelmente provocados por grãos mistos ou grãos com inclusões. A amostra 4, minerais intermedicamente magnéticos, é exclusivamente constituída por turmalina, valor algo estranho, pois na análise com lupa foi detetada uma maior variedade mineral nesta amostra. A amostra 5, rejeitado do processo de flutuação, é maioritariamente constituída por

quartzo, apresentando também valores significativos de andaluzite e turmalina, na análise com o QEMSCAN estes foram também os minerais mais representativos.

Resumidamente, este tipo de análise não é o método mais adequado quando se trata de uma amostra cujos grãos são constituídos por mais do que um mineral.

5.6.2 OBSERVAÇÃO EM LUPA

Na observação em Lupa foram observadas 5 amostras, das quais foram recolhidas várias imagens. A identificação dos minerais foi feita de acordo com Parfenoff, Pomerol & Toureno (1970).

A amostra de rejeitado S40/45 F (rejeitado da flutuação) foi a selecionada devido a possuir uma maior variabilidade mineralógica que as restantes. Esta foi submetida ao processo de separação magnética com 3 intensidades distintas, 1,5, 1 e 0,5 Amperes, resultando assim em quatro produtos. Os produtos resultantes foram os minerais sem suscetibilidade magnética, pouco, intermediamente e altamente magnéticos.

Numa segunda fase os minerais sem suscetibilidade magnética foram separados por densidade, com um tungstato com densidade fixa de 2,75. As massas de cada uma destas amostras está representada na Tabela 5.4, no subcapítulo “Separação Sequencial de Minerais e Balanço de Massas”. A Tabela 5.13 apresenta as amostras e a sua descrição.

Tabela 5.13 - Amostras observação com lupa

Amostra	Densidade	Magnetismo		Minerais
1	$\leq 2,75$	Nulo	$1.5 A < M$	Quartzo e Feldspatos
2	$> 2,75$			Andaluzite, Distena, Quiastolite, Silimanite, Rutilo, Leucoxena, Zircão
3	-	Baixo	$1 A < M < 1.5 A$	-
4		Médio	$0.5 A < M < 1 A$	Andaluzite com inclusões(grafite?), Moscovite, Silimanite, Turmalina
5		Alto	$0 A < M < 0.5 A$	Estaurolite

Na observação da amostra 1, cujos grãos apresentavam densidade inferior a 2,75, foram recolhidas 2 imagens, identificadas como Figura 5.15 a) e b), respetivamente, quartzo e feldspatos.

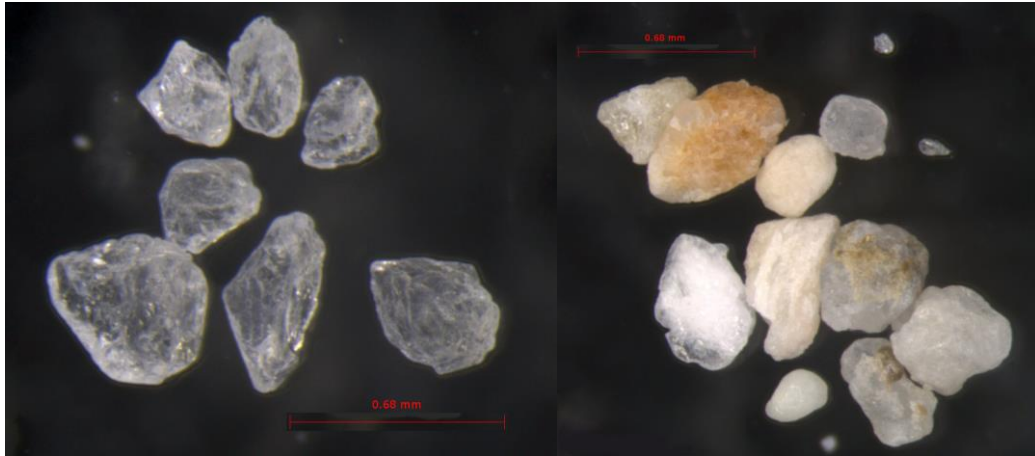


Figura 5.15 - a) Quartzo b) Feldspatos

Na observação da amostra 2, em que grãos apresentavam densidade superior a 2,75, foram recolhidas 7 imagens, identificadas como Figura 5.16 a Figura 5.18, sendo estas de grãos de leucoxena, rutilo, zircão e dos aluminossilicatos, andaluzite, distena, quiastolite (andaluzite com inclusões de grafite) e silimanite.



Figura 5.16 – a) Distena b) Quiastolite c) Andaluzite d) Silimanite



Figura 5.17 – a) Rútilo b) Leucoxena

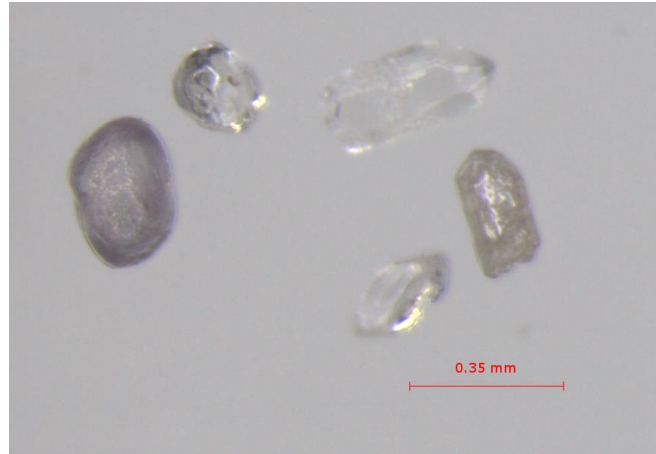


Figura 5.18 - Zircão;

Na observação da amostra 4, em que grãos apresentavam suscetibilidade magnética intermédia, foram recolhidas 4 imagens, identificadas como Figura 5.19 e Figura 5.20, sendo estas de grãos de quiastolite (andaluzite com inclusões de grafite), moscovite, silimanite e turmalina.

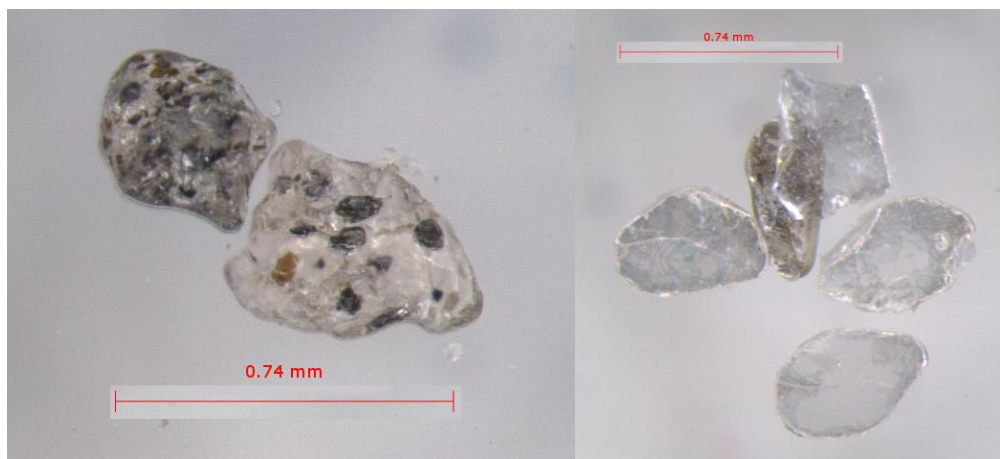


Figura 5.19 – a) Quiastolite b) Moscovite

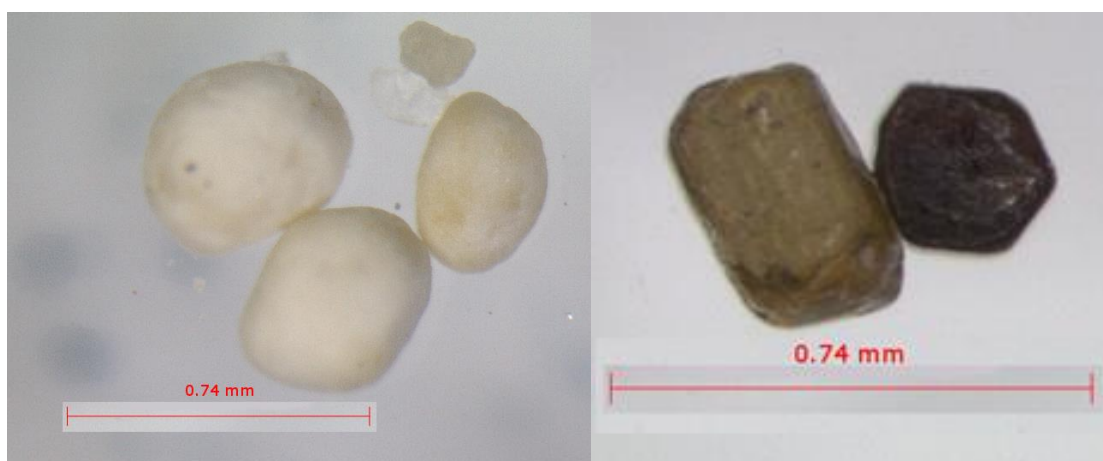


Figura 5.20 – a) Silimanite b) Turmalina

Na observação da amostra 5, em que grãos apresentavam suscetibilidade magnética elevada, somente foram encontrados grãos de mineral, estaurolite, pelo que só foi recolhida 1 imagem, identificada como Figura 5.21.



Figura 5.21 - Esterhuysenite;

Na amostra 1 apenas foram observados Quartzo e Feldspatos, sendo que a quase totalidade dos grãos era do mineral quartzo. Na observação da amostra 2, foi encontrada uma grande variedade mineral, vários aluminossilicatos, tais como andaluzite, distena, quiastolite, leucoxena e silimanite, bem como rutilo, leucoxena e zircão. Constatou-se ainda que a andaluzite era o mineral dominante nesta amostra, representando mais de metade desta. Na amostra 4, observou-se turmalina, quiastolite, moscovite e silimanite. Na amostra 5 o único mineral observado foi esterhuysenite.

5.7 DISCUSSÃO E VALIDAÇÃO DE RESULTADOS

Os principais minerais identificados na análise do equipamento QEMSCAN foram quartzo, turmalina e andaluzite, para além destes foram identificados mais alguns minerais, embora que em menores quantidades, estauroilite, caulinite, feldspato potássico, rútilo e zircão, para além destes minerais, foram ainda identificados óxidos de ferro.

Na análise pela técnica de difração de raios x os principais minerais identificados foram o quartzo, andaluzite e turmalina, sendo identificado rutilo, mas em pequenas quantidades.

Na observação com lupa, os minerais identificados foram quartzo, feldspatos, turmalina, leucoxena (agregado de minerais), rutilo, zircão, moscovite e os aluminossilicatos, andaluzite, distena, quiastolite e silimanite.

Na observação com lupa foi ainda possível observar a associação mineralógica andaluzite/não classificado, que tinha sido indicada na análise estatística, e ainda concluir que o não classificado se tratava de grafite.

Os resultados dos três métodos de identificação utilizados são consistentes. Na análise por difração de raios x os principais minerais identificados, foram os mesmo que na análise do QEMSCAN, quartzo, andaluzite e turmalina. Na observação com lupa todos os principais minerais identificados pelo QEMSCAN e pelo XRD foram identificados.

6. RECOMENDAÇÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação tem como objetivo a caracterização mineralógica das areias exploradas na mina Via-Vai, desde a saída da mina, bem como, ao longo dos processos de beneficição que esta sofre. Essa caracterização foi feita através da análise granulométrica, mineralógica e estatística, e pela separação sequencial de minerais.

Os principais minerais identificados nestas areias, para além do quartzo, foram turmalina, andaluzite, estaurolite, caulinite, feldspatos potássicos, rútilo e zircão, e ainda óxidos de ferro. Os minerais presentes nas amostras que contribuem para o teor de Fe_2O_3 são os óxidos de ferro, estaurolite e turmalina. Para o teor em Al_2O_3 contribuem os aluminossilicatos, turmalina, caulinite e feldspatos.

Na indústria cada produto possui especificações em relação à composição das areias siliciosas utilizadas na sua produção. Na Tabela 6.1, estão descritas essas especificações para os produtos onde estas são mais exigentes.

Tabela 6.1 - Especificações das areias siliciosas para vidro de alta qualidade;

Grau	Produto	SiO_2 %	Fe_2O_3 %	Al_2O_3 %	Cr_2O_3 %
A	Vidro Ótico	99,7	0,013	0,2	0,00015
B	Copo de Cristal	99,6	0,01	0,2	0,0002
C	Vidro de Borossilicato	99,6	0,01	0,2	0,0002
D	Recipientes Incolores	98,8	0,03	0,1	0,0005
E	Vidro Plano	99,0	0,1	0,5	-
F	Recipientes Coloridos	97,0	0,25	0,1	-
G	Fibras de Isolamento	94,5	0,3	3,0	-

Para cumprir os pressupostos da Tabela 6.1 é necessário submeter a matéria prima a um conjunto de processos de beneficição. Esses processos devem ter por base as propriedades descritas na Tabela 6.2, sendo estas as que permitem a sua separação do quartzo.

Tabela 6.2 - Relação propriedade – mineral para separação do quartzo

Propriedade/ Mineral	Granulometria	Densidade	Magnetismo
Turmalina		+	X
Andaluzite		+	
Óxidos de Ferro		+	X
Estaurolite		+	X
Caulinite	X		
Feldspato K		=	
Rútilo		+	X
Zircão		+	X
Moscovite		+	X

A caulinite pode ser separada do quartzo pela sua granulometria inferior. Todos os restantes minerais podem ser separados pela densidade, pois possuem um valor desta propriedade mais elevado em relação ao quartzo, com excepção do feldspato potássico que possui um valor muito semelhante. Tendo em conta o magnetismo, podemos separar a turmalina, óxidos de ferro, estaurolite, rútilo, zircão e moscovite. A propriedade mais diferenciadora entre o quartzo e os restantes minerais é a densidade, pelo que os métodos de beneficiação mais adequados são os que tem como base esta propriedade.

A areia S40 fração 250 µm não densa somente submetida às separações granulométrica e por densidade, já possui valores de quartzo muito significativos, 99,52%. Daqui podemos concluir que a fração granulométrica com menos minerais não quartzo é a fração acima dos 250 µm.

A separação sequencial de minerais permite constatar que os processos de beneficiação efetuados pela empresa são eficazes, pois verifica-se uma redução dos minerais magnéticos e densos a cada amostra, representativa do produto desses processos. Isso significa que ao longo do processamento existe uma redução dos teores de penalizantes, Fe_2O_3 , Al_2O_3 , Al_2O_3 e Cr_2O_3 , e, por conseguinte, um aumento do teor de SiO_2 .

Na análise e processamento estatístico das imagens do QEMSCAN foi detetada a ocorrência de associações minerais, duas delas com maior relevância, turmalina/ caulinite e andaluzite/ não classificado. Além destas foi encontrada uma associação rútilo/ óxidos de ferro. Verificou-se também que o quartzo e a moscovite se encontram quase exclusivamente no estado puro, não possuindo qualquer associação a outro mineral.

A associação mineralógica turmalina/caulinite deve-se a pequenos grãos de caulinite na superfície dos grãos de turmalina, enquanto que a associação andaluzite/não classificado, se deve à

ocorrência de inclusões de grafite nos grãos de andaluzite, correspondendo esta associação à variedade de aluminossilicatos quiastolite.

A ocorrência das referidas associações mineralógicas não deve ter qualquer impacto nos processos de beneficição, pois estas não são nos grãos de quartzo que é o mineral que interessa separar nesta situação.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arenare, D., Rodrigues, O., Araujo, A., & Viana, P. (2009). Espirais Concentradoras No Tratamento De Minérios De Ferro: Uma Breve Revisão. *Tecnologia Em Metalurgia e Materiais*, 5(4), 224–228. <https://doi.org/10.4322/tmm.00504007>
- Ayling, B., Rose, P., Petty, S., Zemach, E., & Drakos, P. (2012). QEMSCAN® Quantitative evaluation of minerals by scanning electron microscopy: capability and application to fracture characterization in geothermal systems. *Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Proceeding*, 11.
- British Geological Survey. (2004). Silica Sand. *Mineral Planning Factsheet*, 10.
- Carriso, R. C. C., & Correia, J. C. G. (2004). CLASSIFICAÇÃO E PENEIRAMENTO. *Centro de Tecnologia Mineral - CETEM*, 4(CT2014-183-00), 197–238. Retrieved from <http://www.ufjf.br/baccan/files/2012/11/Cap-5-Peneiramento.pdf>
- Carvalho, A. M. G., & Pereira, V. (1974). Areias Brancas de Rio Maior. Aspectos Geológico-Econômicos. In *Estudos, Notas e Trabalhos, Volume XXII - Fasc. 1-2* (p. 87). Porto: Serviço de Fomento Mineiro.
- Davis, L. L., & Tepordei, V. V. (1985). Sand and Gravel. In *Mineral Facts and Problems* (1985 Editi, p. 15). Bureau of Mines.
- Dias, R. (2015). *Minerais Pesados de Areias de Rio Maior: Análise de Processos de Separação e Concentração e Caracterização de Concentrados*. Aveiro.
- Dias, R., Araújo, A., Terrinha, P., & Kullberg, J. C. (2013). *Geologia de Portugal - Volume II*. Escolar Editora.
- Dill, H. G. (2010). The “chessboard” classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium. *Earth-Science Reviews*, 100(1–4), 1–420. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.10.011>
- Drzymala, J. (2007). *Mineral Processing, Foundations of Theory and Practice of Minerallurgy*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Ferreira, G. C. (1997). *Avaliação da evolução dos mercados produtores e consumidor de areia industrial no Estado de São Paulo* (Vol. 16). São Pulo: UNESP.
- Ferreira, R. F., Federal, U., Preto, O., Limit, T. M., Ore, I., Based, F., ... Fina, R. (2013). *Estudo de liberação das fases minerais em minérios de ferro*. Universidade Federal de Ouro Preto. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15930.39367>

- França, S. C. A., Luz, A. B., & Inforçati, P. F. (1994). Beneficiamento da Diatomita da Bahia. In *Série Rochas e Minerais Industriais*, n.7 (p. 52). CETEM/MCT.
- Frizado, J. (1985). A Microcomputer-Based X-Ray Diffractogram Simulation Program. *Geological Education*, 33, 277–280.
- Fuerstenau, M., & Han, K. (2003). *Principles of Mineral Processing*. Englewood, Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME).
- Gomes, C. (1988). *ARGILAS - O que são e para que servem*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.
- Gottlieb, P., Wilkie, G., Sutherland, D., Ho-Tun, E., Suthers, S., Perera, K., ... Rayner, J. (2000). Using quantitative electron microscopy for process mineralogy applications. *Jom*, 52(4), 24–25. <https://doi.org/10.1007/s11837-000-0126-9>
- Günzler, H., & Williams, A. (2008). *Handbook of Analytical Techniques. Handbook of Analytical Techniques* (Vol. 1–2). <https://doi.org/10.1002/9783527618323>
- Hongyu, K., Sandanielo, V., & Junior, G. (2015). Análise de Componentes Principais : resumo teórico , aplicação e interpretação. *Engineering and Science*, 1, 83–90. <https://doi.org/10.18607/ES20165053>
- Jaime, P., Gottlieb, P., Butcher, A., & Dobbe, R. (2009). *The Applicability of Automated Mineralogy Process Planning, Process Optimisation, Quality Control, Audit Studies and trouble shooting, with Emphasis on Processing Plants*. (Vol. 78).
- Kullberg, J. C. R. (2000). *Evolução tectónica Mesozóica da bacia Lusitaniana*.
- Luz, A., & Lins, F. (2005). *Rochas & Minerais Industriais. CETEM* (1ª Edição). Rio de Janeiro.
- Mansour, M. (2015). Develop A Strategic Forecast of Silica Sand Based on Supply Chain Decomposition, (1), 9–27.
- Moura, A., & Velho, J. L. (2011). *Recursos Geológicos de Portugal*. Coimbra: Palimage.
- Parfenoff, A., Pomerol, C., & Toureno, J. (1970). *Les Minéraux en Grains – Méthodes d'étude et Détermination*. Paris: Masson et Cie Éditeurs.
- Platias, S., Vatalis, K. I., & Charalabidis, G. (2013). Innovative Processing Techniques for the Production of a Critical Raw Material the High Purity Quartz. *Procedia Economics and Finance*, 5(13), 597–604. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(13\)00070-1](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(13)00070-1)
- Platias, S., Vatalis, K. I., & Charalampides, G. (2014). Suitability of Quartz Sands for Different Industrial Applications. *Procedia Economics and Finance*, 14(14), 491–498.

[https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)00738-2](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00738-2)

- Ribeiro, A., Antunes, M. T., Ferreira, M. P., Rocha, R. B., Soares, A. F., Zbyszewski, G., ... Monteiro, J. H. (1979). Introduction à la géologie générale du Portugal. 26e Congr.Internat.Géol., 1980.
- Terroso, D. L. G. de F. (2005). *Argilas / Lamas e Águas Termais das Furnas (Açores) : Avaliação das Propriedades Físicas e Químicas relevantes para a utilização em Peloterapia.*
- Vatalis, K. I., Charalampides, G., Platias, S., & Benetis, N. P. (2014). Market Developments and Industrial Innovative Applications of High Purity Quartz Refines. *Procedia Economics and Finance*, 14(14), 624–633. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)00751-5](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00751-5)
- Visa Consultores. (2004). *Estudo de impacte ambiental do projecto da mina de caulino de Via-Vai.*
- Yim, O., & Ramdeen, K. T. (2015). Hierarchical Cluster Analysis: Comparison of Three Linkage Measures and Application to Psychological Data. *The Quantitative Methods for Psychology*, 11(1), 8–21. <https://doi.org/10.20982/tqmp.11.1.p008>
- Zbyszewski, G., & Almeida, F. M. de. (1960). Carta geológica de portugal na escala 1/50 000: Notícia explicativa da folha 26-D, Caldas da Rainha. Retrieved from https://roteirosgeologicos.files.wordpress.com/2010/07/noticia_explicativa_carta_26-d_caldas-da-rainha.pdf
- Zdunczyk, M. J., & Linkous, M. A. (1994). *Industrial Minerals and Rocks, 6th Edition, Society for Mining, Metallurgical and Exploration Inc.* Donald D. Car Editor.